



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INDUSTRIAS**

INGENIERÍA EN AUTOMATIZACION Y ROBOTICA

**“FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍAS RENOVABLES SOLAR
Y EOLICA PARA CONTROL DE TEMPERATURA”**

**AUTOR:
DANILO ENRIQUE DIAZ AVELLO**

**PROFESOR GUÍA:
Mg. FRANCISCO FERRADA ALVAREZ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AUTOMATIZACION Y ROBOTICA**

**SANTIAGO – CHILE
DICIEMBRE, 2018**

Dedicatoria

En primer lugar, a mi madre Carola y mi padre Ernesto quienes me apoyaron incondicionalmente durante todo el transcurso de este proceso, me entregaron valores, contención, aliento y ánimos en los momentos más difíciles como estudiante, son unos padres excepcionales.

A mis hermanos Javier y Benjamín que a pesar de ser más pequeños me ayudaron y motivaron en diferentes momentos permitiéndome ser un ejemplo para ellos.

A mis abuelos que siempre me apoyaron en todo ámbito, no solo como estudiante sino ayudándome cada día a mejorar como persona.

A todos ellos, muchas gracias.

Agradecimientos

A mi Profesor Guía, Sr. Francisco Ferrada Álvarez, por su tiempo, paciencia, respuestas claras y su apoyo para lograr terminar la memoria.

A mi pareja Giselle, quien me ayudo, comprendió y motivo cada minuto todos estos años, entregándome su incondicionalidad, apoyo y consejos en todo momento.

A mi mejor amigo Sebastián, quien siempre me alentó a seguir adelante, sin pensar en las dificultades.

Y por último, a todos los profesores que estuvieron conmigo a lo largo de la carrera, enseñando sus conocimientos y aclarando mis dudas en todo momento sin objeción.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

La siguiente investigación, habla acerca de la sustentabilidad energética a base de energías renovables, enfocándose principalmente en las energías solar y eólica para el control de procesos.

Esta inquietud nace debido a los problemas energéticos que se ven reflejados cada vez más en la actualidad, por lo cual se decidió investigar las potencias asociadas a diferentes sistemas de control de temperatura, con el fin de ver la factibilidad que tienen las energías renovables para auto sustentar dichas potencias y procesos.

La finalidad del presente estudio es reducir el consumo energético para empresas o industrias que consten con una gran cantidad de costos en sus procesos debido al consumo generado. Buscando así, una opción para las industrias que sea factible y viable a base de energías renovables.

Finalmente, se concluye según lo realizado en la memoria y basado en los resultados obtenidos, comprobando la factibilidad de implementación de estos sistemas y si se logró cumplir el objetivo principal.

Índice

Resumen.....	3
Capítulo 1: Antecedentes Generales.	11
1.1 Introducción.	11
1.2 Objetivo General.....	12
1.3 Objetivos Específicos.....	12
1.4 Antecedentes Históricos.	13
Capítulo 2: Conceptos y Descripciones Generales.....	15
2.1 Fuentes de Energía.....	15
2.2 ¿Qué es energía?	17
2.3 ¿Qué son las energías renovables?.....	18
2.4 Energía Mareomotriz.	18
2.4.1 Métodos de Generación.....	19
2.5 Energía Hidráulica.	21
2.5.1 Tipos de Centrales Hidroeléctrica.	21
2.6 Energía Geotérmica.	23
2.6.1 Fuentes de Energía Geotérmica	24
2.7 Biomasa.	26
2.7.1 Tipos de Biomasa.	27
2.7.1.1 Biomasa Natural.....	27
2.7.1.2 Biomasa Residual.	27
2.8 Energía Eólica.....	28
2.8.1 Tipos de Centrales Eólicas.	29
2.8.1.1 Aerogeneradores con turbinas de eje vertical.	29
2.8.1.2 Aerogeneradores con turbinas de eje horizontal.	30
2.8.2 Partes de un Aerogenerador.	31
2.8.3 Características de un Aerogenerador.	33
2.9 Energía Solar.....	34
2.9.1 Tipos de Energía Solar.....	34
2.9.1.1 Energía Térmica.	34
2.9.1.2 Energía Fotovoltaica.....	36
○ ¿Qué es un sistema Fotovoltaico?.....	37
• Módulos Fotovoltaicos.....	38
– Tipos de celdas fotovoltaicas.	40

– Rendimiento.....	43
– Radiación solar.	45
– Potencia.	46
• Baterías.	47
• Controlador de carga.	48
• Inversor.	49
• Cargas de aplicación.	50
Capítulo 3: Estudio, Análisis y Desarrollo de la Energía Fotovoltaica y Energía Eólica para Control de Temperatura.....	52
3.1 Análisis y Estudio de un Panel Fotovoltaico.	52
3.1.1 Principio de Funcionamiento Básico.	52
3.1.2 Principio de Funcionamiento Eléctrico.	53
3.1.3 Eficiencia.....	55
3.1.3.1 Factores de Eficiencia de una Celda Fotovoltaica.....	55
3.1.4 Estudio de Parámetros Eléctricos.	57
3.2 Análisis y Estudio de un Aerogenerador Eólico.	65
3.2.1 Principio de Funcionamiento.....	65
3.2.2 Sistemas Principales de los Aerogeneradores.	66
3.2.3 Estrategias de Funcionamiento.	71
3.2.4 Estudio de Parámetros Eólicos.	74
3.2.4.1 Energía del Viento.....	74
3.2.4.2 Densidad del viento.	74
3.2.4.3 Tamaño de aspas del Aerogenerador.	76
3.2.4.4 Velocidad del Viento.	77
3.2.4.5 Aerodinámica.....	79
3.2.4.6 Tren de Potencia.....	81
3.2.4.7 Maquina Eléctrica.	82
3.3 Análisis y Estudio de un Sistema de Control de Temperatura Industrial.....	83
3.3.1 Principio de Funcionamiento.....	83
3.3.2 Descripción de Conceptos y Componentes.	84
3.3.3 Controlador PID.	86
Capítulo 4: Simulaciones y Estudio de Resultados.....	88
4.1 Simulaciones.....	88
4.1.1 Simulación de Celda y Módulo Fotovoltaico.	88

4.1.2	Simulación de Aerogenerador Eólico.	92
4.1.3	Simulación de Sistema de Control de Temperatura.	94
4.2	Resultados.	97
4.2.1	Costo de Implementación.	97
4.2.2	Polinomio Asociado a Costo de Implementación de Sistemas Híbridos.	101
4.2.3	Calculo Costo Energético.	102
4.2.4	Polinomio Asociado a Costo Energético.	105
4.2.5	Recuperación de Inversión.	106
4.2.6	Polinomio de Recuperación de Inversión.	107
4.3	Gráficos de Resultados.	108
4.3.1	Gráfico de Consumo vs Costo de Implementación.	108
4.3.2	Gráfico de Consumo vs Costo Energético.	109
4.3.3	Gráfico de Costo de Implementación en el Tiempo.	110
Capítulo 5: Conclusiones.		113
5.1	Conclusión de Memoria de Título.	113
Bibliografía.		116

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Fuentes de energía.....	16
Figura 2.2 – Generador Mareomotriz de Corriente de Marea.....	19
Figura 2.3 – Generador Mareomotriz de Presa de Marea.....	20
Figura 2.4 – Central Hidroeléctrica.....	22
Figura 2.5 – Geiser.....	24
Figura 2.6 – Proceso de Generación de Energía Geotérmica.....	25
Figura 2.7 – Ciclo de la Biomasa.....	26
Figura 2.8 – Generador de energía eólica.....	29
Figura 2.9 – Darrieus.....	30
Figura 2.10 – Panemonas.....	30
Figura 2.11 – Sabonius.....	30
Figura 2.12 – Turbinas eje horizontal.....	30
Figura 2.13 – Partes de un Aerogenerador.....	31
Figura 2.14 – Central Termo Solar.....	35
Figura 2.15 – Central Fotovoltaica.....	36
Figura 2.16 – Estructura de Celda Fotovoltaica.....	39
Figura 2.17 – Modulo Fotovoltaico.....	39
Figura 2.18 – Silicio Monocristalino.....	42
Figura 2.19 – Silicio Policristalino.....	42
Figura 2.20 – Silicio Amorfo.....	42
Figura 2.21 – Radiación Solar.....	45
Figura 2.22 – Batería para Sistemas Fotovoltaico.....	48
Figura 2.23 – Controlador de carga de Sistemas Fotovoltaico.....	49
Figura 2.24 – Inversor de Sistemas Fotovoltaico.....	50
Figura 3.1 – Celda Fotovoltaica en Circuito Abierto.....	58

Figura 3.2 – Celda Fotovoltaica en Cortocircuito.....	58
Figura 3.3 – Curvas de Parámetros Eléctricos.....	60
Figura 3.4 – Representación de Aerogeneradores.....	76
Figura 3.5 – Esquema Representativo de Sistema de Control de Temperatura.....	87
Figura 4.1 – Diagrama Interno Bloque de Celda Solar.....	89
Figura 4.2 – Simulación de una Celda Solar en Simulink.....	90
Figura 4.3 – Simulación de un Módulo Solar en Simulink.....	91
Figura 4.4 – Simulación de un Aerogenerador en Simulink.....	93
Figura 4.5 – Simulación de un Control de Temperatura en Simulink.....	95

Índice de Ecuaciones

Ecuación 3.1 – Eficiencia de una Celda Solar.....	56
Ecuación 3.2 – Factor de Llenado.....	57
Ecuación 3.3 – Potencia Suministrada.....	59
Ecuación 3.4 – Potencia Máxima de Suministro.....	59
Ecuación 3.5 – Intensidad en Cortocircuito.....	61
Ecuación 3.6 – Temperatura de Trabajo.....	63
Ecuación 3.7 – Potencia del Aire.....	74
Ecuación 3.8 – Área del Aerogenerador.....	76
Ecuación 3.9 – Distribución de Probabilidad Eólica.....	77
Ecuación 3.10 – Velocidad en Función de la Altura 1.....	78
Ecuación 3.11 – Velocidad en Función de la Altura 2.....	79
Ecuación 3.12 – Potencia del Aerogenerador.....	79
Ecuación 3.13 – Velocidad en Punta de Pala.....	80
Ecuación 3.14 – Tren de Potencia.....	81
Ecuación 3.15 – Inercia Total.....	81
Ecuación 3.16 – Maquina Eléctrica.....	82
Ecuación 3.17 – Algoritmo PID.....	86
Ecuación 3.18 – Polinomio Costo de Implementación.....	101
Ecuación 3.19 – Polinomio Costo Energético.....	105
Ecuación 3.20 – Polinomio Recuperación de Inversión.....	107

Índice de Tablas

Tabla 2.1 – Potencial Hidroeléctrico.....	22
Tabla 4.1 – Costo de Implementación Sistema Fotovoltaico.....	98
Tabla 4.2 – Costo de Implementación Sistema Eólico.....	99
Tabla 4.3 – Costo de Implementación Sistema Híbrido.....	100
Tabla 4.4 – Cargos Fijos.....	102
Tabla 4.5 – Tarifas de Suministro Eléctrico.....	102
Tabla 4.6 – Costo Energético.....	104
Tabla 4.7 – Recuperación de la Inversión.....	106

Índice de Gráficos

Grafico 2.1 – Rendimiento de Celdas Fotovoltaicas.....	43
Grafico 3.1 – Efectos de la Irradiancia.....	61
Grafico 3.2 – Efectos de la Temperatura (Intensidad vs Voltaje).....	62
Grafico 3.3 – Efectos de la Temperatura (Potencia vs Voltaje).....	63
Grafico 3.4 – Factores de Densidad.....	75
Grafico 3.5 – Factores de Velocidad.....	78
Grafico 4.1 – Respuesta en Control de Temperatura Simulink.....	96
Grafico 4.2 – Consumo vs Costo de Implementación.....	108
Grafico 4.3 – Consumo vs Costo Energético.....	109
Grafico 4.4 – Costo de Implementación en el Tiempo (Ideal).....	110
Grafico 4.5 – Costo de Implementación en el Tiempo (Relativa).....	111
Grafico 4.6 – Costo de Implementación en el Tiempo (Defectiva).....	112

Capítulo 1: Antecedentes Generales.

1.1 Introducción.

El mundo se está viendo enfrentado a problemas energéticos hace ya algunos años, debido al veloz agotamiento de reservas mundiales de combustibles fósiles, los cuales eran el principal componente y generador directo de energías, sin embargo la evaporación de estos combustibles fósiles también provocan problemas para el medio ambiente. Debido a esto las necesidades energéticas del mundo están sufriendo un cambio radical y por lo cual se está buscando, estudiando, diseñando, analizando e implementando nuevas ideas, proyectos e inversiones sobre tipos de tecnologías que permitan crear distintas formas de aprovechar los variados tipos de energías naturales con el propósito de convertirlas en energía eléctrica, las que además cuentan con la ventaja de ser renovables y ser mínimamente dañinas para el medio ambiente.

En la actualidad, las energías renovables no convencionales son un tema de tendencia e impacto mundial, ya que cada día aumentan más las necesidades energéticas, transformándose en un pilar fundamental para la sociedad y sobre todo para las industrias que aprovechan este tipo de energías naturales para buscar la ansiada auto sustentabilidad energética.

Chile es un país en desarrollo, y como tal, se espera que en los próximos años aumente el crecimiento económico, además la productividad de los distintos sectores económicos debiera aumentar con el objeto de satisfacer todas aquellas necesidades básicas de las personas e industrias. Con el tiempo se está viendo reflejado el crecimiento poblacional e industrial del mundo, por lo cual las necesidades energéticas siguen aumentando sin cesar. En este punto la energía eléctrica o electricidad toma un rol fundamental, ya que es la energía más utilizada del mundo y con el pasar del tiempo se vuelve cada vez más indispensable para el hogar y a nivel industrial.

Chile es uno de los países que más fuentes de recursos energéticos poseen, pero aun es un país en crecimiento respecto a las energías renovables no convencionales, además debido a su geografía se ve altamente beneficiado de recursos naturales, principalmente nos enfocaremos en la energía eólica y energía solar fotovoltaica, ya que son unas de las energías con mayor proyección hoy en día y de suma importancia para el futuro. (Fernando, 2018)

La memoria se enfocara en las energías renovables no convencionales, dando mayor importancia a la energía fotovoltaica y energía eólica. Se realizara un sistema hibrido entre estas energías, con el fin de analizar la factibilidad de su implementación y la auto-sustentabilidad para el control procesos industriales. Además se realizaran todos los estudios pertinentes para analizar este tipo de sistemas. Lo que llevara a realizar simulaciones con el fin de corroborar nuestros estudios y concluir con los resultados obtenidos.

1.2 Objetivo General.

- Estudiar, analizar e investigar la factibilidad de implementación de sistemas híbridos solar y eólico para auto sustentar el control de procesos industriales.

1.3 Objetivos Específicos.

- Investigar las energías renovables no convencionales en Chile.
- Estudiar y analizar la energía solar y energía eólica para el control de procesos.
- Investigar, realizar y comprender simulaciones de sistemas renovables para el control de procesos.

1.4 Antecedentes Históricos.

La modernización del mercado eléctrico chileno comenzó a latir a principios de los años 1980, sin embargo, los cambios fundamentales se comenzaron a notar en 1990, cuando el mercado energético nacional visualizó un alza en su crecimiento.

En 1992 se comenzaron a definir pautas de crecimiento debido a que los procesos mineros empezaron a generar una mayor cantidad de energía y mayores costos en su producción, inicializando que la necesidad energética del país comenzaba a crecer.

Con los años se instalaron cada vez más industrias, por lo cual la necesidad energética del país se elevó considerablemente, a partir de esto se despertó aún más el incentivo de comenzar a desarrollar e implementar energías renovables no convencionales, con el objetivo de generar un impacto fundamental a nivel nacional.

El término de “Energías renovables no convencionales”, es un concepto chileno único en el mundo, ya que mundialmente solo se les llama “Energías Renovables”, pero mediante la ley 20.257 se decidió agregar el término “No convencional” con el fin de diferenciar aquellas tecnologías que tienen una mayor madurez y desarrollo en nuestro país.

Chile vive una etapa radical en su historia, dado que tiene el enorme desafío de producir las condiciones adecuadas para llegar a ser un país desarrollado en el futuro. Las energías renovables no convencionales es un tema que el gobierno busca acelerar para nuestras fuentes energéticas, de manera que sean capaces de abarcar un mayor porcentaje de generación de energía.

En el año 2013 Chile en busca de lograr este desafío estableció la ley 20.698, la cual indica que en el año 2025, el 20% de las energías comercializadas debe provenir de energías renovable no convencionales. El 17% de las energías producidas hasta el año 2017 provinieron de energías naturales, lo que muestra el crecimiento del país. Según estudios realizados por la Estrategia Nacional de Energía, Chile podría ser capaz de superar la meta propuesta para el año 2025 anticipadamente, debido a que cuenta con una alta gama de recursos naturales, tales como la Energía Eólica y Energía Solar principalmente. Existen otras fuentes de energías naturales que son bastante solicitadas y utilizadas en el país, pero nos enfocamos en estas, ya que son los tipos de energía con mayor proyección para el futuro.

Según análisis y estudios en el año 2050, se debiera producir el 80% de energías comercializadas mediante energías renovables no convencionales, y ya para el año 2070 debiera estar al 100%, con lo cual el gobierno busca ser un país de desarrollo mundial. (Fajardo, 2014)

Capítulo 2: Conceptos y Descripciones Generales.

Este capítulo de la memoria se centra en definir y dar a conocer los variados tipos de energías renovables, con lo cual se da a entender a pequeños y grandes rasgos algunos conceptos y definiciones relevantes. Además de investigar la factibilidad de la utilización de las energías renovables no convencionales para nuestro país y la implementación de antiguas y nuevas tecnologías para estas aplicaciones. El capítulo se enfoca con mayor detalle en la energía solar fotovoltaica y energía eólica, ya que estas energías son las que se analizan y estudian en esta memoria para cumplir el objetivo planteado.

2.1 Fuentes de Energía.

La energía es primordial en nuestras vidas, tanto para la sociedad como para las industrias, ya sea económicamente o para los avances tecnológicos del mundo.

El planeta posee grandes cantidades de energía, pero uno o el problema más relevante es la forma de transformarla en energía utilizable, mayormente estas fuentes de energía derivan del sol a excepción de la energía nuclear, geotérmica y las mareas. Sin embargo las fuentes de energía más buscadas son las que tienen un alto contenido energético y almacenan energías en la menor cantidad de materia posible, y en este aspecto encontramos lo que es el petróleo, carbón y gas natural, por otro lado hay energías que aún se encuentran difusas como lo es la energía solar, eólica y geotérmica entre otras energías. La transformación de estas energías se basa en distintos tipos de tecnologías dependiendo en donde se necesite implementar.

Las energías renovables no convencionales y la utilización eficientes de estas energías buscan minimizar los gastos energéticos del mundo. A nivel nacional las fuentes primarias y más importantes de generación de energía renovable son provenientes del sol, el viento y el océano. (Pérez Porto y Gardey, 2014)

En la Figura 2.1 se especifican las fuentes de energías existentes.

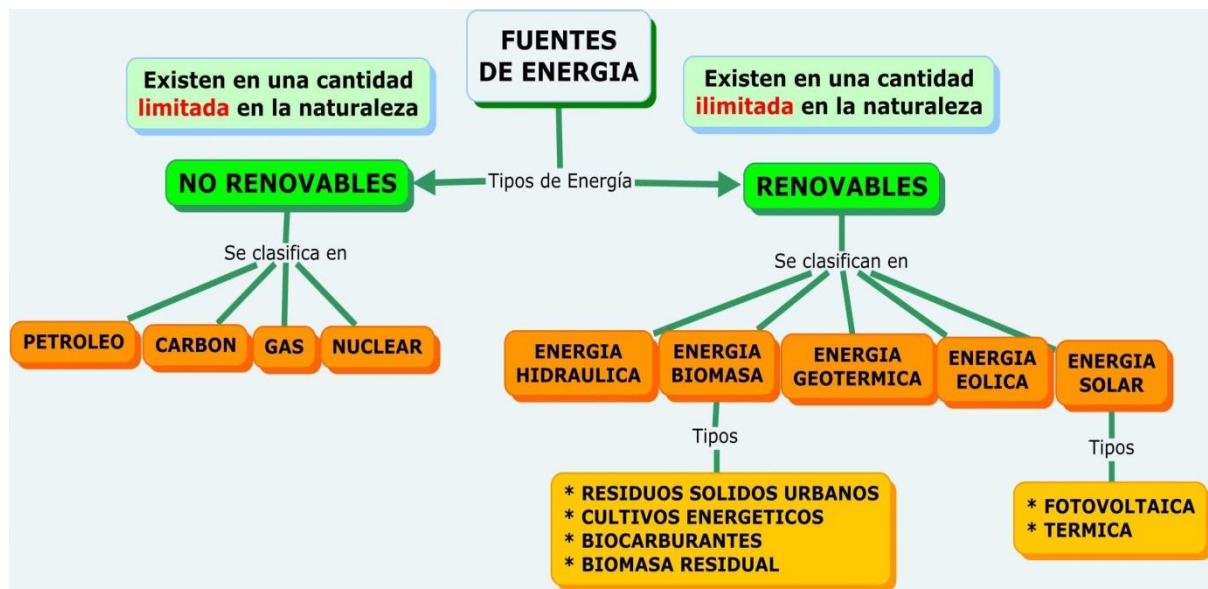


Figura 2.1 – Fuentes de energía

2.2 ¿Qué es energía?

Para poder conocer y estudiar los distintos tipos de energía primero se debe saber que es la energía en sí. Por definición, el concepto de energía abarca dos grandes ámbitos, el primero es en física donde se define a la energía como la capacidad para realizar un trabajo, mientras que lo segundo es la parte tecnológica y económica donde se refiere a la energía como un recurso natural para poder extraer, transformar y darle un uso industrial o económico.

En general se puede encontrar una variedad de energías donde existen diversos recursos naturales o fenómenos de la naturaleza, los cuales son capaces de generar o distribuir energía en cualquiera de sus formas, a esto se le llama energías naturales o recursos energéticos, pero estas se definen en dos tipos: las energías renovables, las que son “ilimitadas” y energías no renovables, las cuales son “limitadas”.

La característica o propiedad más importante y relevante de la energía es que esta se puede transferir por diferentes medios, ya sea en forma de calor, sonido, movimiento, entre los más usuales. Estos tipos de energías se presentan siempre en el entorno, ya sea por medio de energía mecánica, eléctrica, eólica, térmica, cinética, potencial, entre muchas otras. Por otra parte, cabe resaltar nuevamente que las principales fuentes de energías provienen del petróleo y combustibles fósiles, pero como ya se sabe estos recursos son energías no renovables, por lo cual tarde o temprano se terminaran. Así cabe resaltar que las energías alternativas son y serán un pilar fundamental en el futuro, no obstante existen algunas que requieren costos económicos altos y generan inconvenientes. (Merino y Perez Porto, 2012)

2.3 ¿Qué son las energías renovables?

Las energías renovables, son aquellas formas de energía alternativa que existen para relevar a los combustibles fósiles y tienen la principal característica de que son inagotables en sus procesos de transformación, además producen un impacto ambiental significativamente inferior. Las energías alternativas son capaces de generar electricidad a partir de fuentes de energía natural, como el sol, viento, mareas y olas. Esto da comienzo a las variedades de energías que se conocen hoy en día, como la energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía hidráulica, energía mareomotriz, entre otras. (Pérez Porto y Gardey, 2014)

2.4 Energía Mareomotriz.

La energía mareomotriz es una de las más extensas y grandes del mundo, debido a las inmensas cantidades de mares y océanos de los cuales se beneficia el planeta, además se caracteriza por ser una energía limpia y renovable. Esta energía se produce gracias al movimiento generado por las mareas, las cuales son aprovechadas por turbinas y que a su vez son capaces de mover la mecánica de un alternador para generar energía eléctrica, esto va conectado hacia una central en la tierra que administra la energía hacia distintos ámbitos, ya sea para la comunidad o industrias.

Esta energía dentro de sus ventajas está el de ser predecible y tener un suministro seguro con un potencial que no varía de forma significativa, solo se limita a los ciclos de marea y corrientes marinas.

Las instalaciones para este tipo de energía se llevan a cabo principalmente en tres escenarios posibles, desembocaduras de río hacia el océano, ríos profundos y fundamentalmente debajo del océano aprovechando las corrientes marinas. Una característica importante de esta energía es que tiene un efecto particular dependiendo del sol, la luna y la tierra, principalmente la luna por su cercanía y su efecto mayoritario hacia las mareas. (Evolución de Costos ERNC, 2012)

La energía mareomotriz se basa en tres métodos de generación, tales como; generador de corriente de marea, presa de marea y energía mareomotriz dinámica.

2.4.1 Métodos de Generación.

- **Generador de Corriente de la marea.**

Los generadores de corriente de marea basan su funcionamiento en la energía cinética que produce el movimiento del agua, esto abastece a las turbinas de energía, de manera similar al viento (aire en movimiento) donde se utilizan las turbinas eólicas. Este método de generación de energía está ganando popularidad debido a que tiene costos más bajos y produce un menor impacto ecológico en comparación con las presas de marea.

La Figura 2.2 representa un generador de corriente de marea utilizado en la producción de energía mareomotriz.

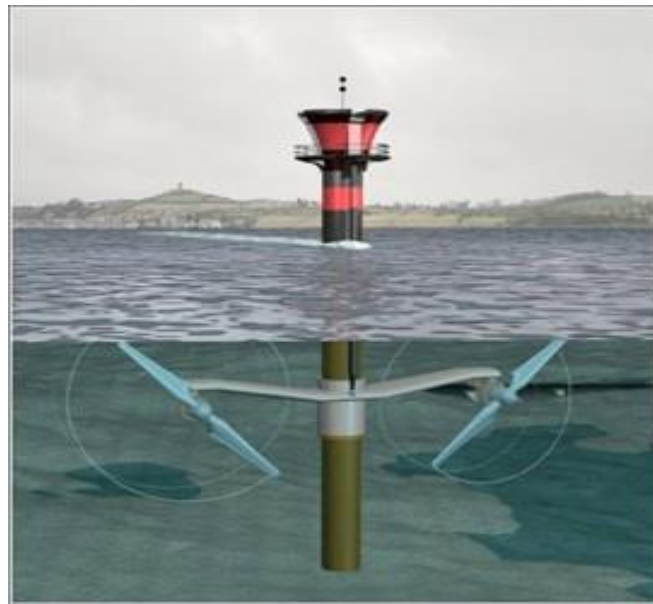


Figura 2.2 – Generador Mareomotriz de Corriente de Marea.

- **Presas de marea.**

Las presas de marea utilizan la energía potencial que existe entre diferencia de altura o pérdida de carga entre las mareas altas y bajas. Las presas son fundamentalmente muros para contener la fuerza del agua, estas son construidas en todo el ancho de un río con gran caudal, por desgracia estas sufren los altos costos de la infraestructura civil, la escasez mundial de sitios viables y los impactos ambientales.

En la Figura 2.3 se muestra un generador de presa de marea implementado en la fabricación de energía mareomotriz.

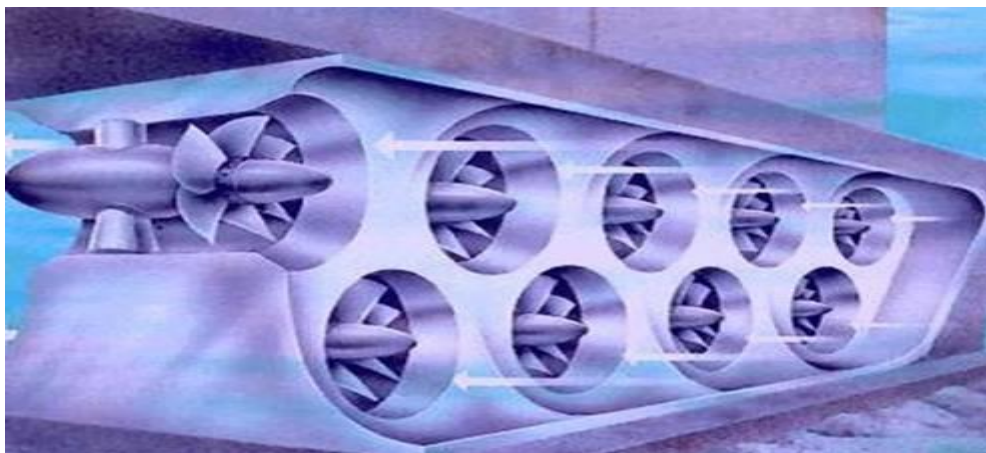


Figura 2.3 – Generador Mareomotriz de Presa de Marea

- **Energía Mareomotriz Dinámica.**

Básicamente es una tecnología de generación teórica de energía, la que explota la interacción entre las energías potencial y cinética en las corrientes de marea. Generalmente es más factible y recomendable que las presas muy largas y extensas (por ejemplo: 30 a 50 km de longitud) se construyan desde las costas hacia afuera en el mar o el océano, sin encerrar un área. Para esto se introducen en la presa ciertas diferencias de fase de mareas, lo que produce un diferencial en el nivel de agua considerable (por lo menos 2.3 metros) en aguas marinas ribereñas poco profundas con corrientes de mareas que oscilan paralelas a la costa. Existen represas que generan en una escala de 6 a 17 GW de energía, como por ejemplo en el Reino Unido, China y Corea.

2.5 Energía Hidráulica.

La energía hidráulica renovable se centra en aprovechar la caída del agua desde las alturas para generar energía eléctrica. Existen dos factores que influyen para emplear la energía hidráulica: la altura y el caudal. Para una mejor explotación de la energía hidráulica, se fabrican presas para regular el caudal dependiendo de la época del año.

Cuando se necesita generar energía en estas centrales, las presas liberan el agua almacenada para mover una turbina engranada con un generador de energía eléctrica, con el fin de que la energía potencial se convierta en energía cinética transmitiéndose a las maquinarias. El agua atraviesa las turbinas a una gran velocidad, produciendo un movimiento de rotación que mediante generadores produce la energía eléctrica. Actualmente en las centrales hidroeléctricas existe uno de los mejores exponentes, la cual es la energía mini hidráulica, la que es de bajo impacto ambiental.

Las centrales hidroeléctricas se definen dependiendo de la potencia que son capaces de generar y la capacidad que tienen para poder acumular energía eléctrica. (Generadoras de Chile, Energía hidroelectrica, 2017)

2.5.1 Tipos de Centrales Hidroeléctrica.

- **Centrales Hidroeléctricas de gran potencia.**

Estas centrales son las capaces de producir más de 10MW de potencia eléctrica.

- **Mini Centrales Hidroeléctricas.**

Estas centrales son capaces de producir entre 1MW y 10MW de potencia eléctrica.

- **Micro Centrales Hidroeléctricas.**

Estas centrales son las cuales producen menos de 1MW de potencia eléctrica.

En la figura 2.4 se visualiza una central hidroeléctrica.

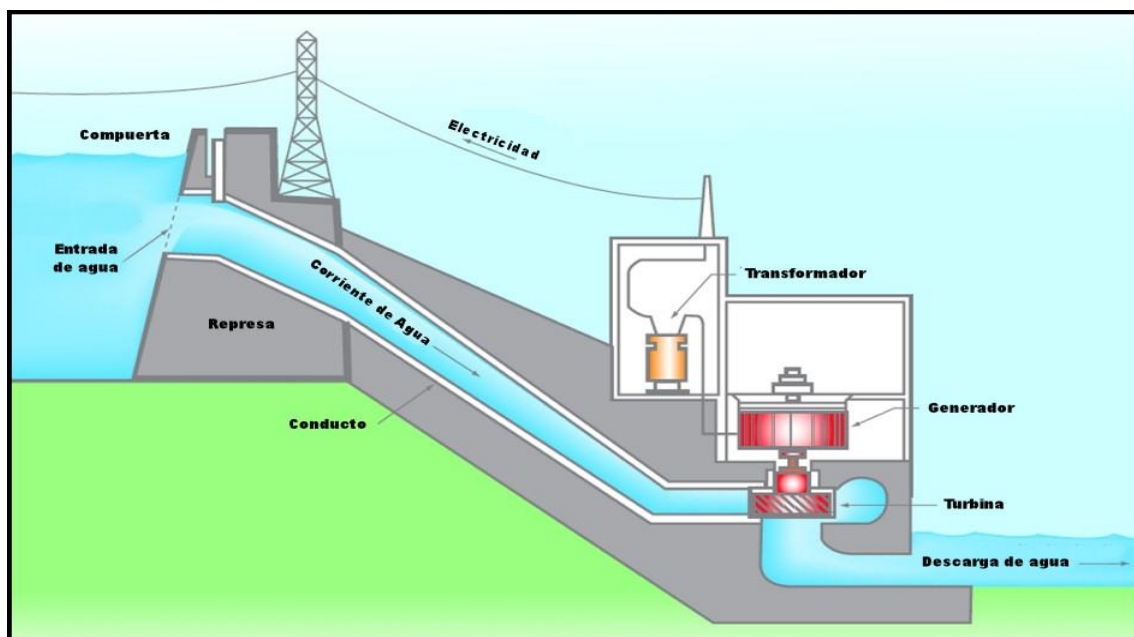


Figura 2.4 – Central Hidroeléctrica

Chile tiene un gran consumo e instalaciones de centrales hidroeléctricas, en la Tabla 2.1 se muestran el potencial hidroeléctrico a lo largo del país.

Tabla 2.1 – Potencial Hidroeléctrico

Cuenca	Potencial hidroeléctrico (MW)	Proporción
Biobío	2.902	18%
Baker	1.918	12%
Palena	1.797	11%
Pascua	1.694	11%
Yelcho	1.403	9%
Maule	1.368	9%
Toltén	1.123	7%
Valdivia	906	6%
Aysén	848	5%
Bueno	807	5%
Cisnes	619	4%
Puelo	552	3%
Total	15.937	100%

2.6 Energía Geotérmica.

La energía geotérmica utiliza el calor de las profundidades de la tierra como núcleo de su existencia, este calor es liberado naturalmente por los procesos de descomposición nuclear que se genera dentro de la tierra, esto principalmente es producido por el Torio, Potasio e Isotopos radioactivos de Urano que se encuentran en las profundidades de nuestro planeta, todo esto para generar energía a través de altas presiones de vapor de agua y poder mover una turbina o sistema integrado. El potencial de esta energía es muy gigantesco pero lamentablemente solo una pequeña parte puede ser aprovechada, ya que depende relevantemente de las condiciones geológicas del entorno.

Los recursos geotérmicos son clasificados según el rango de temperatura que es capaz de generar, cuando se habla de baja temperatura se refiere entre 50C y 100C, además se utiliza principalmente para calefacción. Por otro lado cuando las temperaturas se encuentran sobre los 150C son utilizados para generar energía eléctrica.

Chile tiene un gran potencial geotérmico, debido a su ubicación geográfica y que además forma parte del cinturón de Fuego del Pacífico. En el norte grande del país se estima un potencial geotérmico de 2.000 MW y en la zona central de 1.350 MW. En el 2017, Chile inauguró la primera planta geotérmica de América del Sur con un total de 48 MW con lo cual se estima que esta planta sea capaz de generar energía suficiente para abastecer más de 165.000 mil hogares. (erenovables, 2018)

Existen tres fuentes de energía geotérmica con las cuales se puede obtener beneficios energéticos.

2.6.1 Fuentes de Energía Geotérmica

- **Agua Caliente.**

Los yacimientos de agua caliente pueden ser en forma de depósito o fuente, este método fue antiguamente utilizado por el Imperio Romano, que consistía en usar distintas tuberías de aguas calientes para generar termas. Por otro lado, podemos encontrar otro tipo de yacimiento de agua caliente como lo son los acuíferos subterráneos, a lo cual se refiere con aguas subterráneas a altas temperaturas mientras están se encuentran a baja profundidad.

- **Geiser.**

A estos tipos de yacimiento se les llama fuentes geo presurizadas y se encuentran a altas profundidades (entre 3000 y 9000 metros). Lo particular de estos yacimientos es que las temperaturas involucradas son medianamente pequeñas pero las presiones en estos sitios son extremadamente altas.

En simples palabras se puede definir un geiser como un surtido de agua hirviendo, debido a que se produce cuando una gran cantidad de agua subterránea se evapora y esta es eyectada agresivamente hacia el exterior, generando una reacción química y física en este proceso. Estos sucesos se pueden apreciar fácil y principalmente en zonas volcánicas.

En la Figura 2.5 se aprecia este método de generación, donde las plantas geotérmicas priorizan su instalación cerca de volcanes.

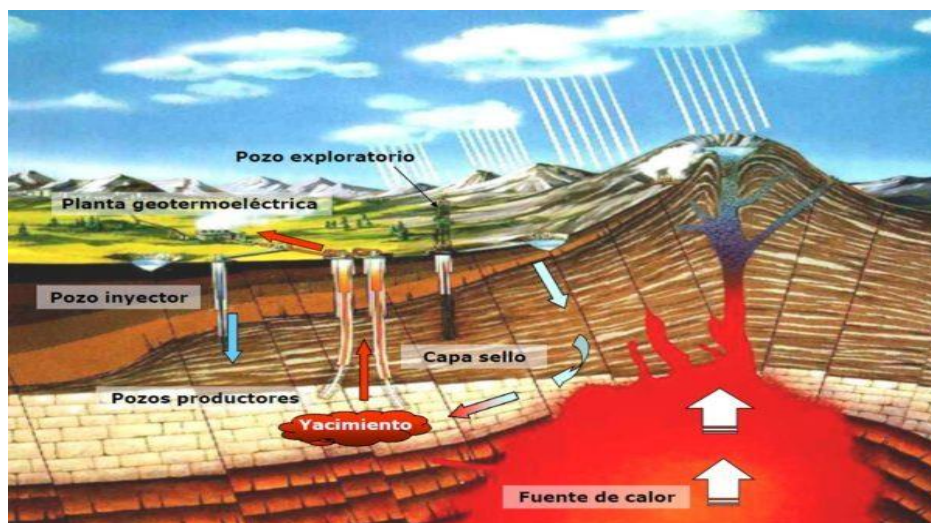


Figura 2.5 – Geiser

- **Yacimiento seco.**

Este tipo de yacimiento no necesita de agua para poder producir energía geotérmica pero si será necesario para poder utilizarla, ya que realmente este proceso se debe a un tipo de producción artificial. A esto se le llama fuentes petrotermales, estas fuentes se forman por bancos de rocas a profundidades muy grandes pero además se caracterizan por la ausencia que existe de agua en estos sitios. Más del 80% de la energía geotérmica de nuestro planeta son de este tipo, pero su explotación es muy difícil de realizar, debido a la falta de agua (como se mencionó anteriormente), por lo cual es necesario intervenir y añadir agua como se ve reflejado en la Figura 2.6.

La Figura 2.6 muestra el proceso de energía eléctrica mediante la energía geotérmica.

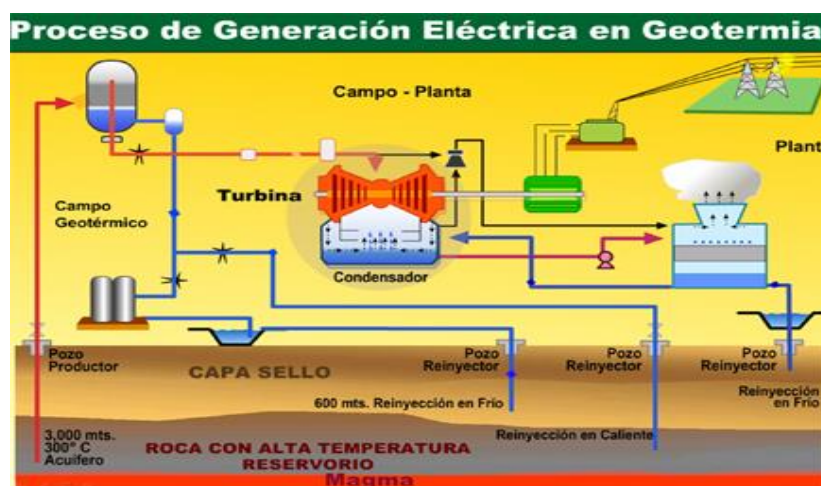


Figura 2.6 – Proceso de Generación de Energía Geotérmica

2.7 Biomasa.

La biomasa son materias orgánicas producidas por plantas y/o animales, incluyendo en esto los desechos o residuos orgánicos. En un claro ejemplo de esto se puede encontrar las hojas de árboles, madera, excremento de animales, restos de frutos secos, desechos de agricultura entre otros.

En la Figura 2.7 se muestra el ciclo necesario para la biomasa.

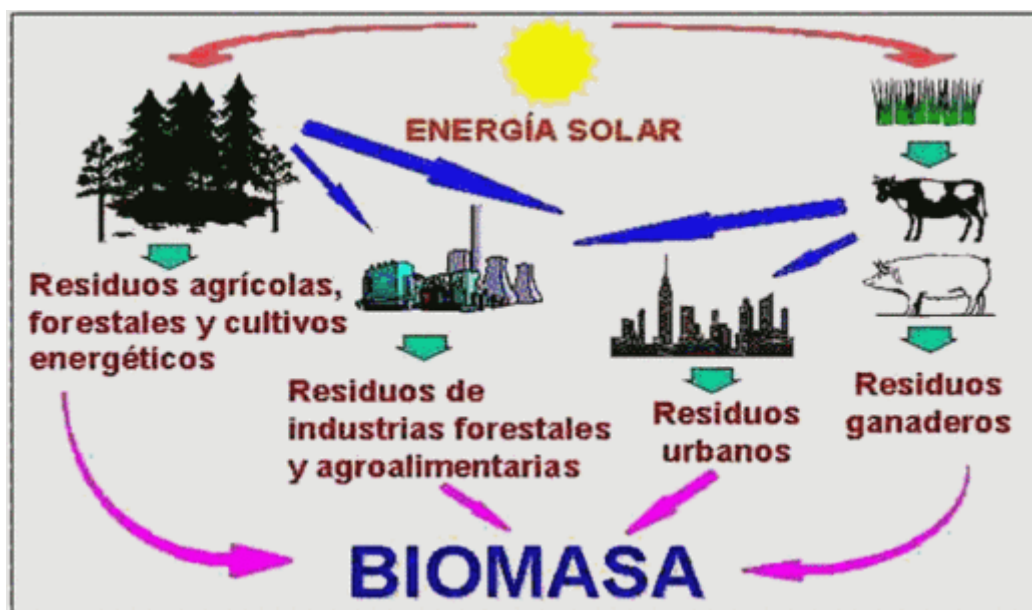


Figura 2.7 – Ciclo de la Biomasa

Por otro lado, cuando se refieren a la biomasa se centran en ella como una fuente de energía renovable, además del proceso que se necesita para generar energía. El principio para este proceso comienza cuando las plantas, mediante la fotosíntesis, acumulan energía solar y la convierten en energía química, a esto se le conoce como bioenergía, la que se transforma en combustible.

Los procedimientos para transformar la biomasa en energía se dividen en dos métodos, combustión directa e indirecta. En este punto las calderas de combustión juegan un rol fundamental, ya que dependiendo de los residuos utilizados se pueden generar tanto combustibles naturales como energía eléctrica y/o térmica. (Plantadebiomasa, 2016)

2.7.1 Tipos de Biomasa.

2.7.1.1 Biomasa Natural.

Este tipo de biomasa se refiere a todos los residuos provenientes de ecosistemas naturales como por ejemplo leñas, ramas, restos de plantaciones, hojas, entre muchas más.

2.7.1.2 Biomasa Residual.

Principalmente la biomasa residual es toda la materia orgánica producida por las actividades de los seres humanos, la cual se divide en dos: excedentes agrícolas y cultivos energéticos.

- **Cultivos Energéticos.**

Estos cultivos son fundamentalmente para la producción de energía y se basan en los productos alimenticios que son de gran productividad de biomasa.

- **Excedentes Agrícolas.**

Los excedentes agrícolas son todo lo que no se utiliza en los procesos alimenticios y son considerados para fines energéticos. Estos pueden ser utilizados tanto como combustible en plantas de generación eléctrica como transformados en biocombustibles.

2.8 Energía Eólica.

La energía eólica es la energía renovable más utilizada y eficiente del mundo. Principalmente la fuente de generación que utiliza esta energía es la fuerza del viento para así poder generar electricidad mediante aerogeneradores que básicamente son molinos de viento capaces de transformar dicha energía.

Los aerogeneradores están compuestos por una turbina eólica y un generador eléctrico que principalmente cumplen la función de transformar la energía proporcionada por el viento en energía eléctrica. Estos equipos se pueden instalar tanto en suelo firme como en suelos marinos, además pueden ser de distintos tamaños dependiendo de la aplicación en la que se requiera utilizar.

El potencial eólico se calcula en función de la distribución de la velocidad del viento. Los aerogeneradores situados en sitios donde las medias de velocidad del viento son de 8 metros por segundo en la altura del eje del rotor producen entre el 75% y el 100% más de electricidad que aquellas donde el viento sopla a una media de 6 metros por segundo. Un aerogenerador de 1,8 MW situado a un buen emplazamiento produce más de 4,7 millones de unidades de electricidad cada año.

En la actualidad, Chile aun es un país que está en desarrollo con la energía eólica, sin embargo a nivel mundial existen algunos países líderes en esta energía. Dentro de estos países se encuentran España, Alemania, Estados Unidos, India y china. (Generadoras de Chile, Energía Eolica, 2017)

La Figura 2.8 muestra una generadora de energía eólica y los componentes básicos para un sistema eólico.

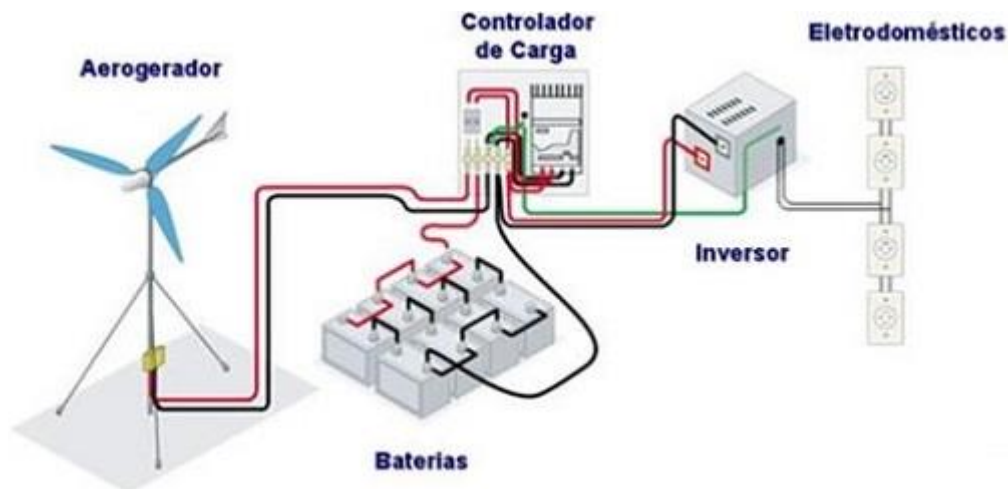


Figura 2.8 – Generador de energía eólica.

2.8.1 Tipos de Centrales Eólicas.

Para clasificar las centrales eólicas existen tres criterios: orientación de las turbinas (horizontal/ vertical), características de la instalación (en tierra / mar) y conectividad a la red (conectadas / no conectadas). A continuación detallaremos la diferencia entre turbinas de eje horizontal y vertical.

2.8.1.1 Aerogeneradores con turbinas de eje vertical.

Estas turbinas tienen un eje de rotación en forma perpendicular al suelo y su utilización no es tan frecuente, además dependiendo de la turbina que se utilice, se pueden clasificar en darrieus (2 o 3 arcos), panemonas (4 o más semicírculos) o savonius (2 o más filas de semicilindros).

En las Figuras 2.9, 2.10 y 2.11 se especifican los aerogeneradores con turbinas de eje vertical.



Figura 2.9 – Darrieus.



Figura 2.10 –Panemonas.



Figura 2.11 –Sabonius

2.8.1.2 Aerogeneradores con turbinas de eje horizontal.

Estas turbinas tienen un eje de rotación en forma paralela al suelo y constan de tres aspas, además estos sistemas son de grandes alturas y se utilizan de forma frecuente.

En Figura 2.12 se aprecian los aerogeneradores con turbinas de eje horizontal.



Figura 2.12 – Turbinas eje horizontal

2.8.2 Partes de un Aerogenerador.

Los aerogeneradores eólicos son estructuras de considerable tamaño, a medida que aumenta la capacidad que pueden generar, también aumenta el tamaño de la estructura, por lo cual esto afecta directamente a los componentes involucrados para el funcionamiento, debido a que deben ser de una capacidad acorde a lo necesitado.

Los aerogeneradores eólicos se componen de una variedad de elementos que hacen posible su funcionamiento, en la Figura 2.13 se muestran los componentes principales de estas maquinarias eólicas. (centraleolicaa, 2010)

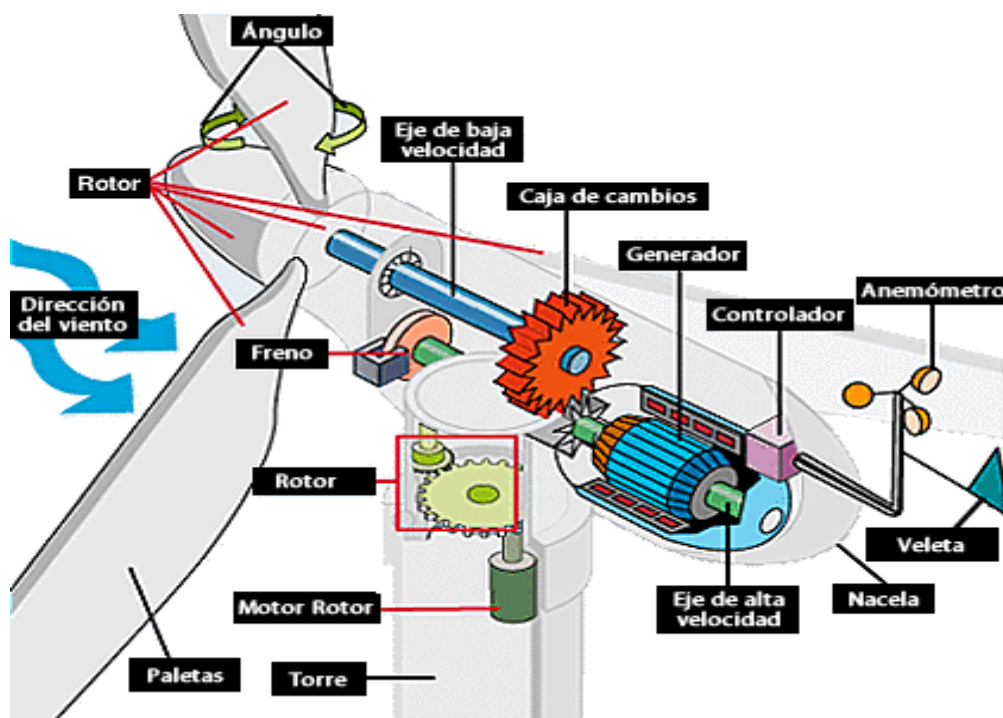


Figura 2.13 – Partes de un Aerogenerador

Las partes principales de un aerogenerador son el rotor, la caja de engranajes, el generador, la torre y el sistema de control. La velocidad de movimiento de las hélices es muy lenta y mediante la caja de engranajes esa velocidad lenta de las palas se transforma en velocidad rápida para alimentar al generador.

La mayoría de los aerogeneradores modernos son de tres palas, de eje horizontal y con mecanismos eléctricos de orientación. El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina para obtener el máximo rendimiento o para protegerlo ante vientos peligrosos.

Todos los componentes de un aerogenerador son importantes, pero existen algunos que son completamente fundamentales para el funcionamiento. Tales como:

- La góndola: Carcasa que protege las partes fundamentales del aerogenerador.
- Las palas del rotor: Transmiten la potencia del viento hacia el buje.
- El buje: La parte que une las palas del rotor con el eje de baja velocidad.
- Eje de baja velocidad: Conecta el buje del rotor al multiplicador. Su velocidad de giro es muy lenta.
- El multiplicador: Permite que el eje de alta velocidad gire mucho más rápido que el eje de baja velocidad.
- Eje de alta velocidad: Gira a gran velocidad y permite el funcionamiento del generador eléctrico.
- Generador eléctrico: Es una de las partes más importantes de un aerogenerador. Transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- El controlador electrónico: Es un ordenador que monitoriza las condiciones del viento y controla el mecanismo de orientación.
- La unidad de refrigeración: Mecanismo que sirve para enfriar el generador eléctrico.
- La torre: Parte del aerogenerador que soporta la góndola y el rotor.
- Anemómetro y la Velea: Mide la velocidad y dirección del viento, las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico para controlar el aerogenerador dependiendo de la velocidad del viento.

2.8.3 Características de un Aerogenerador.

El funcionamiento de un aerogenerador puede explicarse mediante en función de los siguientes conceptos:

- **Orientación automática:** El aerogenerador se orienta automáticamente para aprovechar al máximo la energía cinética del viento, a partir de los datos registrados por la veleta y anemómetro que incorpora en la parte superior de la estructura. La barquilla gira sobre una corona situada al final de la torre.
- **Giro de las palas:** El viento hace girar las palas, que comienzan a moverse con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. Con vientos muy fuertes (25 m/s) las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas.
- **Multiplicación:** El viento hace girar las palas, que comienzan a moverse con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. Con vientos muy fuertes (25 m/s) las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas.
- **Generación:** La multiplicadora, a través del eje rápido, transfiere su energía al generador acoplado, que produce electricidad.
- **Evacuación:** La energía generada es conducida por el interior de la torre hasta la base y, desde allí, por línea subterránea hasta la subestación, donde se eleva su tensión para inyectarla a la red eléctrica y distribuirla a los puntos de consumo.
- **Motorización:** Todas las funciones críticas del aerogenerador están monitorizadas y se supervisan desde la subestación y el centro de control, para detectar y resolver cualquier incidencia.

2.9 Energía Solar.

La energía solar es una energía renovable capaz de generar calor y electricidad gracias a la radiación electromagnética proveniente del sol. Tiene la virtud de ser una de las energías renovables con mayor potencial y que además cuenta con un tiempo constante para explotarla, ya que durante el día existen lugares con grandes índices de radiación ultravioleta en todo el mundo, lo que permite y hace capaz tratar con mayor énfasis esta energía.

Chile es uno de los países que más se beneficia de la energía solar gracias a su geografía. En el norte de Chile principalmente donde se encuentra el desierto de Atacama, es uno de los lugares con más índices ultravioleta que se reciben en el mundo, provocando que las industrias o empresas interesadas en utilizar esta energía estén ubicadas en las cercanías de esta parte del país.

Existen distintas formas de aprovechar la energía solar mediante dos tipos de energía. Dentro de estas se pueden encontrar: Energía fotovoltaica y energía foto térmica. (Generadoras de Chile, Energía Solar, 2017)

2.9.1 Tipos de Energía Solar.

2.9.1.1 Energía Térmica.

La energía térmica se explota principalmente mediante las centrales térmicas solares o termo solares son instalaciones industriales las cuales basan su funcionamiento en producir electricidad mediante la radiación solar. Con la radiación solar obtenida se calienta un fluido, el cual se utiliza para generar energía mecánica mediante una turbina, así se produce la potencia necesaria para el alternador y poder generar energía eléctrica.

En la Figura 2.14 se puede visualizar de mejor forma una central termo solar.

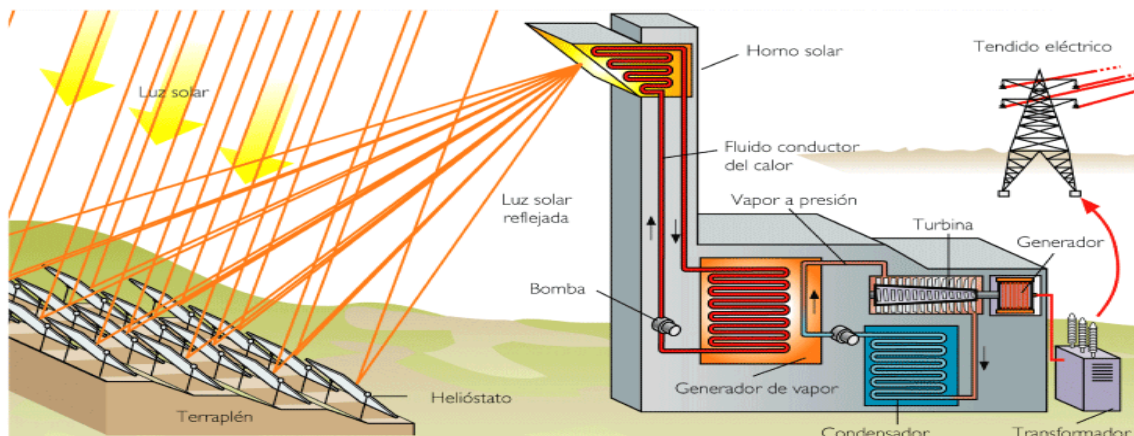


Figura 2.14 – Central Termo Solar.

El proceso asociado a la Figura 2.14 corresponde a un proceso cuyo objetivo principal es adquirir la energía solar, además emplea los conceptos de heliostato y terraplén principalmente, para después ser procesada por distintos elementos de la central termo solar.

El concepto de heliostato hace referencia a un conjunto de espejos que se mueven sobre dos ejes: altura y dirección. Este tipo de tecnología permite que el heliostato se mantenga con movimientos apropiados en los puntos en que más radiación impacta sobre este. Por otra parte, el termino terraplén se refiere a la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel, por lo cual en este proceso se utiliza para dar la altura pertinente y apropiada al heliostato para funcionar eficientemente.

La energía solar es reflejada en el heliostato y dirigida a una base receptora instalada en la central termo solar, la que se encarga de transformar la energía solar obtenida. (unesa, 2015)

2.9.1.2 Energía Fotovoltaica.

La energía fotovoltaica se explota mediante las centrales fotovoltaicas, las que son instalaciones industriales las cuales basan su funcionamiento en suministrar energía eléctrica a la red mediante sistemas fotovoltaicos extensos. Las centrales fotovoltaicas se componen de diferentes componentes, algunos de estos componentes con mayor relevancia que se pueden encontrar son: Torre meteorológica, Células fotovoltaicas, Armario de corriente continua, Inversor, Armario de corriente continua, Centro de transformación, Líneas de transporte, Sala de control.

En la figura 2.15 se puede apreciar una central fotovoltaica.

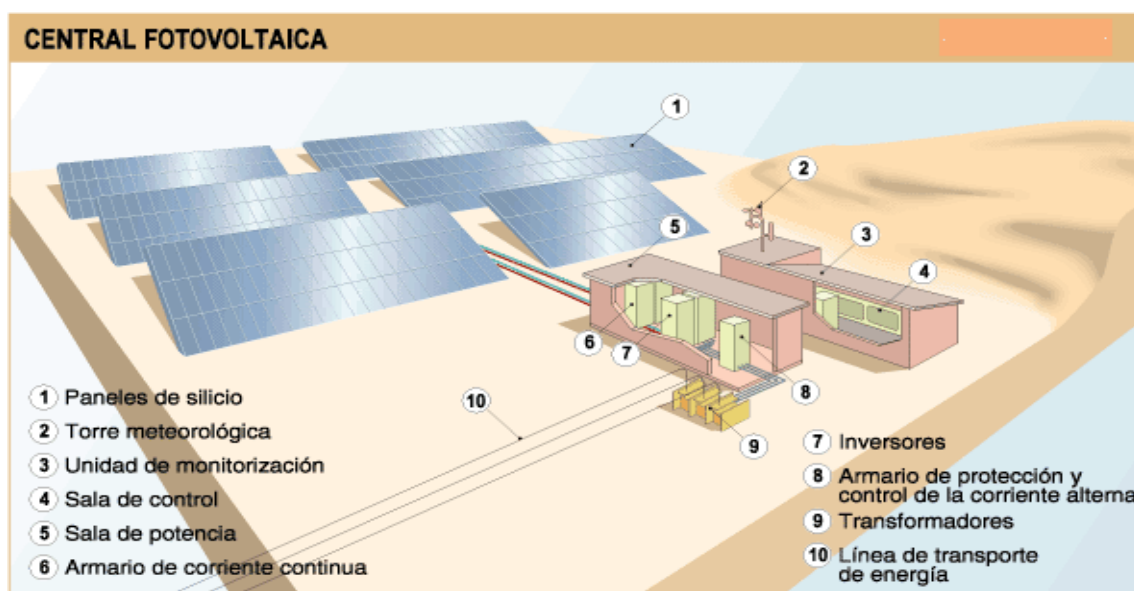


Figura 2.15 – Central Fotovoltaica.

La Figura 2.15 hace referencia a un proceso fotovoltaico que basa su funcionamiento en la obtención de energía solar mediante módulos fotovoltaicos o paneles solares. Estos son los encargados de absorber la energía proveniente del sol y administrar dicha energía a determinadas aplicaciones utilizando los elementos e instrumentos necesarios para su distribución. (atersa, 2017)

○ **¿Qué es un sistema Fotovoltaico?**

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos contruidos e integrados especialmente para realizar cuatro funciones primordiales:

1. Transformar directa y eficientemente la energía solar en energía eléctrica.
2. Almacenar adecuadamente la energía eléctrica generada.
3. Proveer adecuadamente la energía producida y almacenada.
4. Utilizar eficientemente la energía producida y almacenada.

Para realizar estas funciones es necesario contar con equipos aptos para esta tarea, estos equipos son:

- Módulo o panel fotovoltaico:
- Batería.
- Controlador de carga.
- Inversor.
- Cargas de aplicación.

- **Módulos Fotovoltaicos.**

La transformación de energía solar a energía eléctrica se realiza en un equipo llamado módulo o panel fotovoltaico. Los módulos o paneles solares son compuestos por placas rectangulares formadas por un conjunto de celdas fotovoltaicas protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizado. En la Figura 2.16 se especifica más detalladamente las partes de un módulo fotovoltaico.

Los paneles fotovoltaicos se componen de celdas fotovoltaicas, las cuales unidas entre sí y en cantidades forman lo que se conoce como panel o módulo fotovoltaico. La celda fotovoltaica es el componente que capta la energía proveniente del sol y es capaz de transformarla en energía eléctrica, debido a que está compuesta por algunos materiales y minerales semiconductores, donde el silicio es el principal componente. El silicio es el material más abundante en la tierra después del oxígeno, ya que se encuentra en casi todas las rocas, para la fabricación de las celdas fotovoltaicas se lo necesita en su forma cristalina y sin imperfecciones. El proceso para llevar al silicio a su forma cristalina es complejo y costoso. Las celdas fotovoltaicas están compuestas por una delgada capa de material de silicio tipo n (electrón libre) y otra de mayor espesor de material silicio tipo p (hueco disponible), en la unión de estas capas se forma el campo eléctrico. Además se coloca un conductor externo que conecta la capa negativa a la positiva, generándose así el flujo de electrones o corriente eléctrica desde la zona p a la zona n. (Energía solar, 2018)

La Figura 2.16 muestra la estructura básica de una celda fotovoltaica.

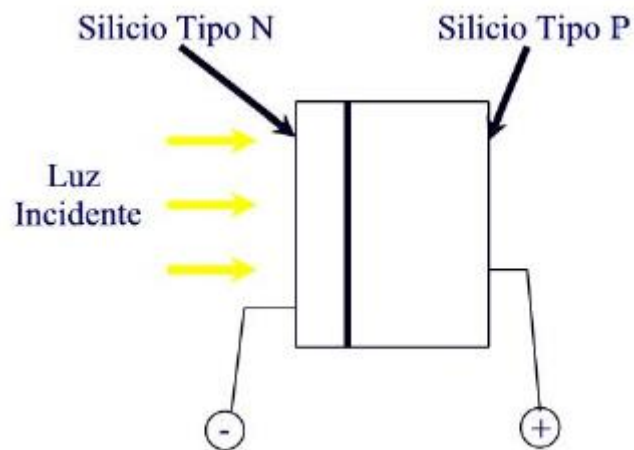


Figura 2.16 – Estructura de Celda Fotovoltaica.

Un panel fotovoltaico consta de 36 celdas fotovoltaicas, sin embargo hay paneles con mayor y menor cantidades. Además cabe resaltar que cada celda que compone un panel es de un tamaño de 10 cm².

Especificando un módulo fotovoltaico y las partes que lo componen se muestra la figura 2.17.

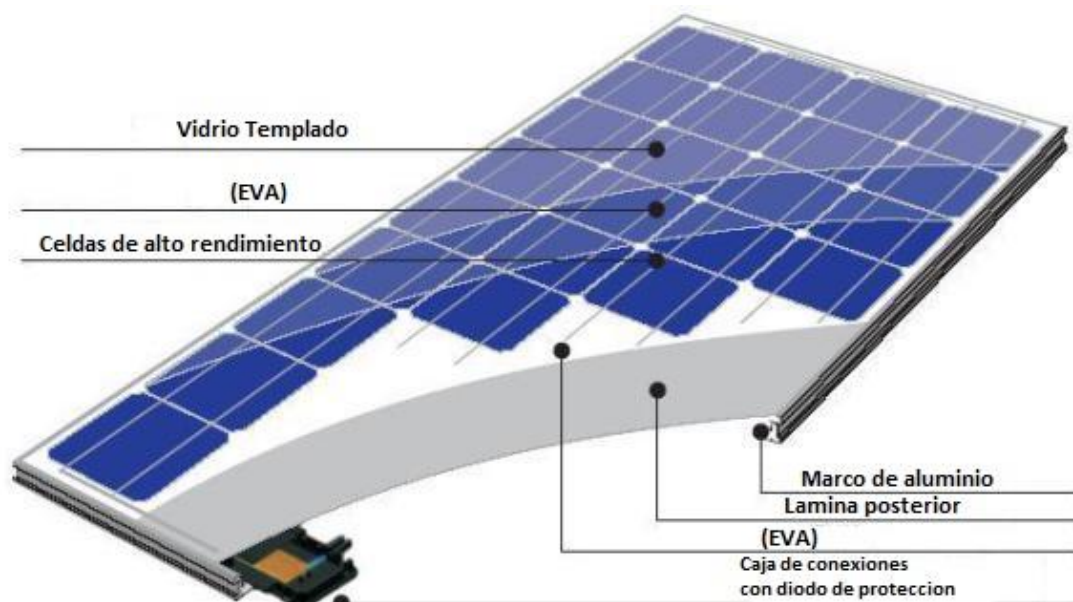


Figura 2.17 – Módulo Fotovoltaico.

– Tipos de celdas fotovoltaicas.

Existen varios tipos de celdas fotovoltaicas y aunque el silicio es el componente principal y más común, no es el único, debido a que depende de los semiconductores utilizados en su fabricación. (Energía solar, 2018)

1. Celdas de arseniuro de galio: Son las más recomendables para la fabricación de módulos fotovoltaicos debido a que en su versión mono cristalina el rendimiento llega hasta el 28% de efectividad. Sus principales características son su elevado coeficiente de absorción y sus bajas pérdidas de eficiencia a elevadas temperaturas, por lo que son muy utilizadas en sistemas de concentración, por otro lado el principal problema es el elevado costo de este material. Hoy en día se investiga en combinar el arseniuro de galio con silicio para llegar a rendimientos por sobre el 30% donde se han obtenidos resultados exitosos.
2. Celdas de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre: Este sistema tiene un fácil proceso de fabricación, en el cual se necesita muy poco material, pero debido a esto su rendimiento es demasiado bajo, llegando a valores del 5% en la práctica. El mayor problema es su degradación en el transcurso del tiempo y la tecnología con la que se producen no está desarrollada así que aún se necesitan muchos estudios para mejorar esta técnica.
3. Celdas bifaciales: Estos sistemas son fabricados con una doble unión del tipo n+-p-p+ de tal manera que la célula puede absorber radiación por ambas caras, aprovechando también la que es reflejada desde el suelo. El rendimiento es mayor que las células mono faciales, pero sus costos de fabricación también se elevan. Por estos motivos actualmente se encuentran en desuso.

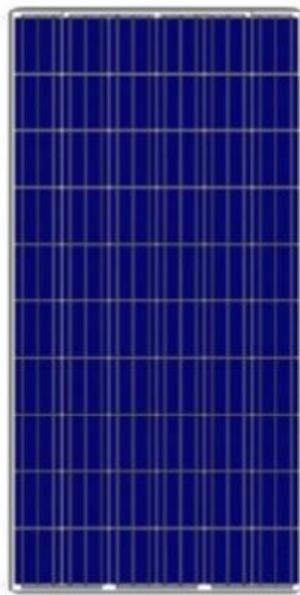
4. Celdas de silicio mono cristalino: Estos sistemas son los más utilizados actualmente, su estructura es completamente ordenada, aunque el factor en contra que tiene, es que el proceso para llegar a la mono cristalización requiere de mucho tiempo y energía, por esta razón su costo es elevado. Estos sistemas se obtienen dopando silicio puro con boro, generando un rendimiento que llega entre el 18% y 22%. Actualmente se está investigando procesos de bajo costo y que sean capaces de aumentar su rendimiento mediante la utilización de nano partículas de plata y así se ha llegado a aumentar en un 2,3%.
5. Celdas de silicio amorfo: La gran ventaja de estos sistemas es que el espesor de las celdas fotovoltaicas puede ser 50 veces más fino que el de las de silicio mono cristalino, presentan un alto grado de absorción y al ser compuestas por menos cantidad de material su fabricación es más económica. Sus desventajas son que su rendimiento es menor al 10%, mucho menor que las de silicio mono cristalino (18%-22%), y su alto grado de degradación al entrar en contacto con el sol. En la actualidad se está investigando muchas variaciones en el proceso de fabricación para hacer de estas células más eficientes y ya se han alcanzado rendimientos de hasta 12,24%.
6. Celdas de silicio poli cristalino: Estos sistemas son fabricados de forma similar al del silicio mono cristalino pero no necesita un riguroso control de temperatura en su etapa de enfriamiento. Su rendimiento llega entre el 14% - 17% y su costo es ligeramente más económico que el del mono cristalino. La ventaja es que se pueden producir directamente celdas de forma cuadrada sin necesidad de cortes posteriores. Anteriormente estas células no eran muy utilizadas ya que la diferencia de costo con respecto a las mono cristalinas era mínima, pero estudios actuales indican que hay nuevas tecnologías que harán que las células poli cristalinas vuelvan a competir con las tecnologías tradicionales.

En la Figura 2.18, 2.19, 2.20 se presentan los tres diferentes tipos de módulos fotovoltaicos de silicio.



MONOCRISTALINOS

Figura 2.18 –
Silicio Monocristalino.



POLICRISTALINOS

Figura 2.19 –
Silicio Policristalino.



CAPA FINA (Amorfos)

Figura 2.20 –
Silicio Amorfo.

– Rendimiento.

Las celdas fotovoltaicas definen su rendimiento como el resultado de la división entre la potencia máxima de generación eléctrica y la potencia luminosa que se aplica sobre una celda fotovoltaica. Por ejemplo: Una celda fotovoltaica tiene un rendimiento del 10%, esto quiere decir que por cada 100 vatios que recibe, solamente genera 10 vatios extra.

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas varía dependiendo el material de su fabricación. El grafico 2.1 indica la cantidad de celdas necesarias dependiendo el material de fabricación para producir 1 kWh y el espacio físico en metros cuadrados que necesitarían dichas celdas. (SotySolar, 2017)

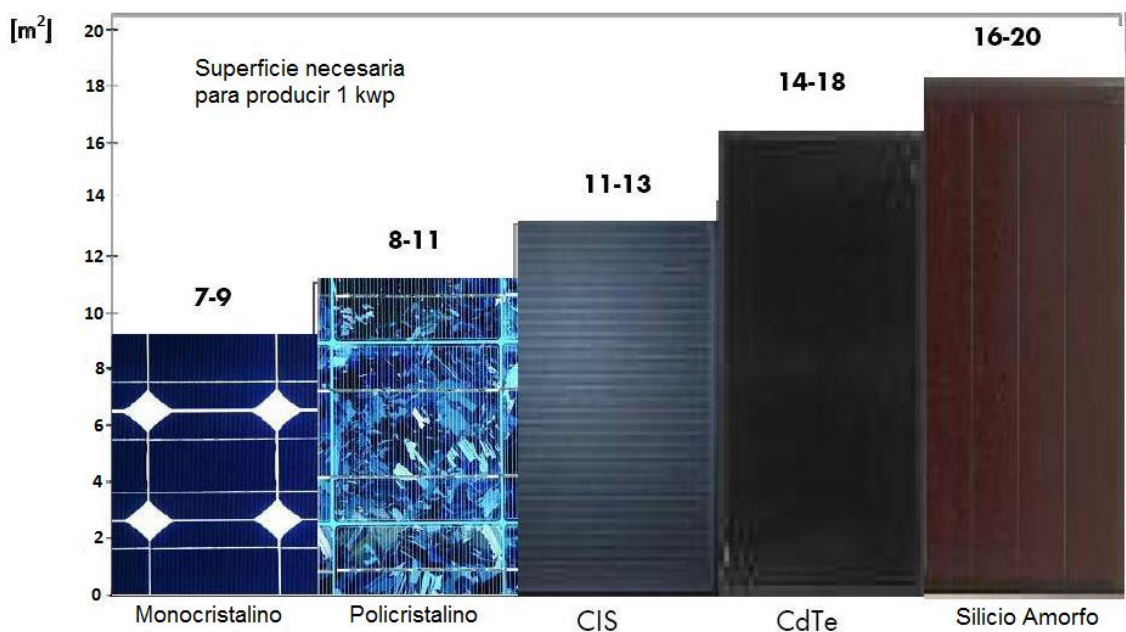


Grafico 2.1 – Rendimiento de Celdas Fotovoltaicas.

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas se puede ver afectado debido a factores que siempre están presentes en estas aplicaciones. Estos factores son:

1. Energía de los fotones incidentes: Puede ser factor de rendimiento cuando los fotones de luz solar no tienen la suficiente energía para romper el enlace del núcleo con el electrón y no permiten la generación del par electrón-hueco. También puede pasar que los fotones de luz tengan demasiada energía y en este caso la energía excedente se desperdicia en forma de calor. Por este factor, se puede perder hasta un 50% de rendimiento en la generación de energía eléctrica de una celda fotovoltaica.
2. Recombinación: Debido al proceso de fabricación y todo lo que implica, una parte de los electrones liberados se vuelven a combinar con huecos cercanos sin generar corriente eléctrica. Por este factor se puede perder hasta un 15% de rendimiento.
3. Reflexión: La luz del sol es reflejada por la celda, aunque actualmente se está investigando en varios recubrimientos que bajan el valor de las pérdidas a un 10%.
4. Otros: Por calentamiento del silicio se estima que se pierde un 2%. Por las sombras generadas por los contactos eléctricos por los que circulan los electrones liberados se estiman pérdidas del 10%.

– Radiación solar.

La radiación solar es el factor que da origen a todo sobre la energía fotovoltaica, además es un factor que depende de la posición del sol y de la tierra, ya que ambos poseen cualidades que permanecen constantes y otras que varían a cada instante.

Existen dos factores importantes a la hora de hablar sobre la radiación solar, estos son:

- Irradiación: Es la cantidad de energía recibida en un periodo de tiempo y su unidad de medida es el $W \cdot h / m^2$
- Irradiancia: Es la potencia recibida en un instante y su unidad de medida es W / m^2 .

La irradiancia que produce el sol es de 63.500 kW/m^2 , pero a suelo terrestre finalmente solo llegan 630 W/m^2 .

Existen tres tipos de radiación que inciden en la tierra, radiación difusa, radiación directa y radiación reflejada. En la figura 2.21 se muestra como se origina cada radiación proveniente del sol. (Energía solar, 2017)

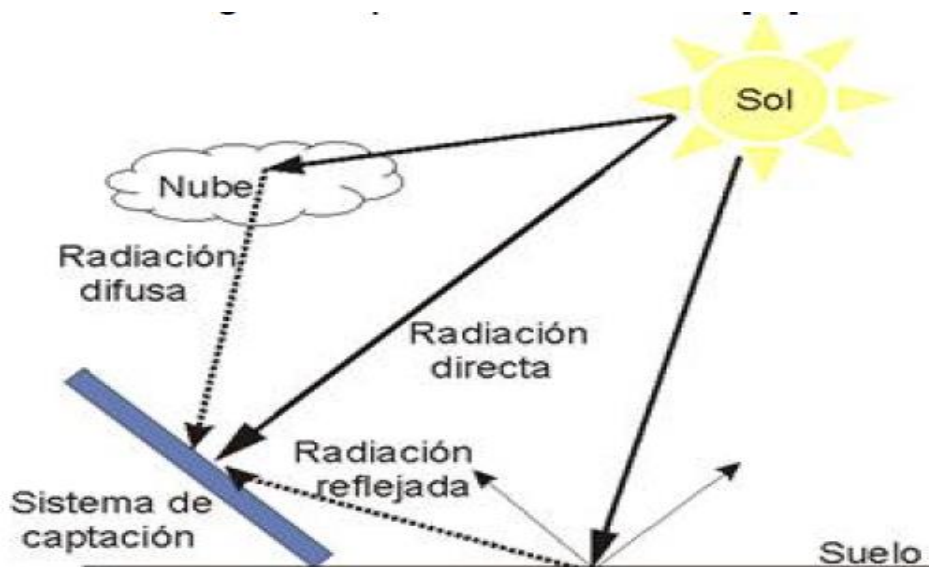


Figura 2.21 – Radiación Solar.

– **Potencia.**

La capacidad energética nominal de los paneles fotovoltaicos se mide vatios-pico (Wp), lo cual muestra la capacidad que tienen para producir electricidad en condiciones ideales y adecuadas de operación.

La capacidad real de un panel fotovoltaico se diferencia altamente de su capacidad nominal, debido a que bajo condiciones reales de operación, la cantidad de radiación que llega sobre las celdas es menor que bajo condiciones ideales u óptimas. Por ejemplo, un módulo de 55 Wp es capaz de producir 55 W más o menos un 10 % de tolerancia cuando recibe una radiación solar de 1.000 vatios por metro cuadrado (W/m²) y sus celdas poseen una temperatura de 25 °C. En condiciones reales, este mismo módulo produciría una potencia mucho menor que 55 W.

En el mercado, se pueden encontrar módulos fotovoltaicos de distintas capacidades. Los de baja potencia son desde 5 Wp; de potencia media se refiere a 55 Wp; y de alta potencia a 160 Wp.

La elección apropiada del tipo y capacidad del módulo fotovoltaico depende de las características propias de la instalación fotovoltaica, tales como radiación solar existente y consumo energético requerido, con lo cual se decide qué tipo de panel utilizar. (Eliseo, 2012)

- **Baterías.**

Las baterías son importantes a la hora de implementar módulos fotovoltaicos debido a que la radiación del sol es variable de día y de noche es prácticamente nula, por lo cual no es constante. Debido a esto se necesitan los equipos apropiados para almacenar la energía eléctrica para cuando las celdas fotovoltaicas absorban la radiación emitida por el sol estos equipos sean capaces de almacenar dicha energía y poder utilizarla cuando se necesite.

El almacenamiento de la energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos se hace a través de baterías que son fabricadas especialmente para este tipo de aplicaciones, por lo cual deben ser capaces de realizar funciones fundamentales para su funcionamiento. Tales como:

- Almacenar energía eléctrica en momentos de gran radiación solar.
- Abastecer de energía eléctrica necesaria en momentos de bajo o nula radiación solar.
- Abastecer de energía eléctrica estable y adecuada para el consumo de equipos o aparatos eléctricos.

Las baterías típicas en estas aplicaciones fotovoltaicas están construidas especialmente para trabajar con ciclos de carga/descarga lentos además de ser generalmente baterías de ciclo profundo lo cual significa que son capaces de descargar una gran cantidad energía antes de que necesiten recargarse.

La capacidad de una batería para un sistema fotovoltaico específico depende netamente de la cantidad de energía que consume diariamente, además de tener en cuenta las condiciones del entorno y las características de la misma batería. La cantidad de energía que una batería puede entregar depende netamente de su descarga, se mide en amperio-hora (Ah) y la tasa de descarga de una batería fotovoltaica es de 100 horas aproximadamente. (Componentes de una instalacion fotovoltaica, 2016)

A continuación se muestra la Figura 2.22 referente a una batería para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.



Figura 2.22 – Batería para Sistemas Fotovoltaico.

- **Controlador de carga.**

El controlador o regulador de carga es un dispositivo electrónico que controla el flujo de la corriente de descarga que entrega la batería a los aparatos eléctricos y también el flujo de la corriente de carga que entregan los módulos hacia la batería. Cuando se carga completamente la batería, el controlador de carga corta el paso de la corriente proveniente de los módulos y si a batería se encuentra totalmente descargada el controlador cortara el flujo de corriente de la batería hacia los aparatos eléctricos. Esto provoca que el regulador de carga sea uno de los elementos más confiables de todo el sistema fotovoltaico siempre y cuando se dimensione e instale correctamente.

Existen diferentes tipos de controladores de carga, pero uno de los más utilizados controladores de carga son los de tipo serie con desconexión automática por bajo voltaje y con indicadores luminosos sobre el estado de carga. De esta forma, estos factores permiten la desconexión automática de la batería cuando el nivel de carga de ésta ha descendido a valores peligrosos. (Componentes de una instalacion fotovoltaica, 2016)

A continuación se muestra la Figura 2.23 donde se visualiza un controlador de carga para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.



Figura 2.23 – Controlador de carga de Sistemas Fotovoltaico.

- **Inversor.**

El inversor es el aparato o equipo que suministra energía eléctrica a la red, este se encarga de transformar la corriente que emiten los paneles fotovoltaicos en corriente alterna para el uso doméstico y/o industrial. Además es el que monitorea la frecuencia, el volumen y la fase de la línea, además produce una onda sinodal donde su frecuencia y fase iguala a la electricidad de red pero con un volumen mucho mayor.

Abastecer correctamente la energía eléctrica no significa hacerlo en forma eficiente y segura para la instalación y las personas; sino que, también significa abastecer energía en la calidad, cantidad y tipo que se necesita, por lo cual es importante saber elegir el tipo de inversor para una correcta aplicación.

Los módulos fotovoltaicos proveen corriente directa a 12 ó 24 Voltios por lo que se requiere de un componente adicional, el inversor, que transforme, a través de dispositivos electrónicos, la corriente directa a 12 V de la batería en corriente alterna a 120 V. (Componentes de una instalación fotovoltaica, 2016)

A continuación se muestra la Figura 2.24 correspondiente a un inversor para aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.



Figura 2.24 – Inversor de Sistemas Fotovoltaico.

- **Cargas de aplicación.**

Los sistemas fotovoltaicos son capaces de abastecer energía eléctrica a diferentes aparatos, y/o aplicaciones, ya sea en el ámbito doméstico o industrial. Algunos ejemplos más comunes son lámparas, televisores, ampollitas o focos para el ámbito doméstico y para el ámbito industrial podemos encontrar motores y/o bombas. (José A. Alonso Lorenzo, 2015)

Las cargas en aplicación son variadas, por lo tanto se dividen en dos tipos:

- Sistemas aislados.
- Sistemas conectados a la red.

- **Sistemas aislados.**

Los sistemas aislados son todos aquellos sistemas que son capaces de generar corriente sin necesidad de estar conectados a la red eléctrica y abastecen energía procedente de la luz del sol. Para ejemplos de estos se pueden encontrar en aplicaciones tales como:

- Telecomunicaciones.
- Electrificación rural.
- Aplicaciones agrícolas.
- Aplicaciones ganaderas.
- Iluminación Pública.
- Señalización.
- Control.
- Desarrollo Rural.

- **Sistemas conectados a la red.**

Los sistemas de conexión a la red son todos aquellos que mediante un campo fotovoltaico y un inversor, son capaces de introducir energía eléctrica a la red.

El inversor que se emplea en este tipo de instalaciones es fundamental, ya que es el núcleo central de la aplicación y debe tener las protecciones adecuadas ante situaciones que se pueden dar en la red eléctrica. Tales como:

- Tensión fuera de rango.
- Corte de la red.
- Desfase en la red.

Capítulo 3: Estudio, Análisis y Desarrollo de la Energía Fotovoltaica y Energía Eólica para Control de Temperatura.

Este capítulo se centra en estudiar y analizar más a profundidad la energía fotovoltaica y energía eólica, con el fin de conocer las capacidades que tienen estas energías para poder auto sustentar sistemas en las industrias. El fin de esto es lograr comprender el proceso y funcionamiento de estas estructuras para ampliar los conocimientos acerca de estos sistemas y poder combinar ambos sistemas con la meta de innovar un sistema automatizado solar/eólico para auto sustentar un control de temperatura para las industrias.

3.1 Análisis y Estudio de un Panel Fotovoltaico.

Un panel fotovoltaico es una estructura capaz de transformar la energía solar en energía eléctrica. Hoy en día existen paneles fotovoltaicos de variados tamaños y materiales, donde día tras día aumentan su rendimiento.

3.1.1 Principio de Funcionamiento Básico.

Los fotones provenientes de la radiación solar impactan sobre la superficie principal del panel, logrando introducirse y siendo absorbidos por los materiales semiconductores, tales como el arseniuro de galio o silicio, esto produce el efecto fotoeléctrico. Paralelamente, los electrones que forman parte del exterior de los átomos, y que están ubicados en los orbitales de energía cuantizada, son golpeados por los fotones, liberándose de los átomos a los que originalmente estaban unidos.

Mediante el proceso anterior, se permite que los electrones sean capaces de circular a través del material y producir electricidad. En el momento en que los átomos pierden electrones, se crean cargas positivas complementarias denominadas huecos y fluyen en sentido opuesto al de los electrones.

Los paneles fotovoltaicos transforman la energía solar, (energía en forma de radiación y que depende de la frecuencia de los fotones) en una determinada cantidad de corriente continua, también denominada DC (acrónimo del inglés Direct Current y que corresponde a un tipo de corriente eléctrica que se describe como un movimiento de cargas en una dirección y un sólo sentido, a través de un circuito. Los electrones se mueven de los potenciales más bajos a los más altos.

La corriente continua (Direct Current - DC) llega a un inversor que transforma la corriente continua en corriente alterna (Alternating Current - AC), debido a que es un tipo de corriente que se encuentra en el suministro eléctrico de cualquier hogar, industria o empresa. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

3.1.2 Principio de Funcionamiento Eléctrico.

Los módulos fotovoltaicos funcionan, como se ha dejado entrever anteriormente, debido al efecto fotoeléctrico. Cada célula fotovoltaica está compuesta de, al menos, dos delgadas láminas de silicio. Una dopada con elementos con menos electrones de valencia que el silicio, denominada P y otra con elementos con más electrones que los átomos de silicio, denominada N.

Aquellos fotones procedentes de la radiación solar, inciden sobre la superficie de la capa P, y al interactuar con el material liberan electrones de los átomos de silicio los cuales, en movimiento, atraviesan la capa de semiconductor, pero no pueden volver. La capa N adquiere una diferencia de potencial respecto a la P. Si se conectan unos conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un dispositivo o elemento eléctrico consumidor de energía que, usualmente y de forma genérica se denomina carga, se iniciará una corriente eléctrica continua.

Este tipo de paneles producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende tanto de su orientación hacia el sol como de su inclinación con respecto a la horizontal, se suelen montar instalaciones de paneles solares con orientación e inclinación fija, por ahorros en mantenimiento. Tanto la inclinación como la orientación, al sur, se fija dependiendo de la latitud y tratando de optimizarla al máximo usando las recomendaciones de la norma ISO correspondiente.

La célula solar más usual está fabricada en silicio y configurada como una gran área de unión p-n. Una simplificación de este tipo de placas puede considerarse como una capa de silicio de tipo n directamente en contacto con una capa de silicio de tipo p. En la práctica, las uniones p-n de las células solares, no están hechas de la manera anterior, más bien, se elaboran por difusión de un tipo de dopante en una de las caras de una oblea de tipo p, o viceversa.

Si la pieza de silicio de tipo p es ubicada en íntimo contacto con una pieza de silicio de tipo n, tiene lugar la difusión de electrones de la región con altas concentraciones de electrones (la cara de tipo n de la unión) hacia la región de bajas concentraciones de electrones (cara tipo p de la unión).

Cuando los electrones se difunden a través de la unión p-n, se recombinan con los huecos de la cara de tipo p. Sin embargo, la difusión de los portadores no continúa indefinidamente. Esta separación de cargas, que la propia difusión crea, genera un campo eléctrico provocado por el desequilibrio de las cargas parando, inmediatamente, el flujo posterior de más cargas que quieran traspasar a través de la unión.

El campo eléctrico establecido a través de la creación de la unión p-n crea un diodo que permite el flujo de corriente en un solo sentido a través de dicha unión. Los electrones pueden pasar del lado de tipo n hacia el interior del lado p, y los huecos pueden pasar del lado de tipo p hacia el lado de tipo n. Esta región donde los electrones se han difundido en la unión se llama región de agotamiento porque no contiene nada más que algunos portadores de carga móviles. Es también conocida como la región de espacio de cargas. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

3.1.3 Eficiencia.

El rendimiento o eficiencia de un panel solar, se define como la relación, expresada como un porcentaje entre la energía captada y convertida en electricidad, en comparación con la energía total incidente en la superficie del mismo modulo. La eficiencia de los módulos fotovoltaicos es un parámetro que se utiliza para establecer el rendimiento y calidad del módulo a utilizar, pero esto dependerá fundamentalmente del material del panel, el tamaño y la radiación solar asociada en el momento. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

3.1.3.1 Factores de Eficiencia de una Celda Fotovoltaica.

La eficiencia de un panel fotovoltaico puede ser afectada por distintos factores, tales como:

- **Punto de máxima potencia.**

Una celda solar puede operar en un amplio rango de voltajes e intensidades de corriente. Esto puede lograrse variando la resistencia de la carga, en el circuito eléctrico o también variando la impedancia de la celda desde el valor cero (valor de cortocircuito) a valores muy altos (circuito abierto) y se puede determinar el punto de potencia máxima teórica, es decir, el punto que maximiza V y tiempo frente a I , o lo que es lo mismo, la carga para la cual la célula puede entregar la máxima potencia eléctrica para un determinado nivel de radiación.

El punto de potencia máxima de un dispositivo fotovoltaico varía con la iluminación incidente. Para sistemas bastante grandes se puede justificar un incremento en el precio con la inclusión de dispositivos que midan la potencia instantánea por medida continua del voltaje y la intensidad de corriente (y de ahí la potencia transferida), y usar esta información para ajustar, de manera dinámica, y en tiempo real, la carga para que se transfiera, siempre, la máxima potencia posible, a pesar de las variaciones de luz, que se produzcan durante el día. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

- **Eficiencia en la conversión de energía.**

La eficiencia de una celda solar, es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una celda solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_m , dividido entre la luz que llega a la celda, en este caso la irradiancia (E , en W/m^2), bajo condiciones estándar y el área superficial de la célula solar (A_c en m^2), como se aprecia en la ecuación 1.

$$n = \frac{P_m}{E * A_c}$$

Ecuación 3.1 – Eficiencia de una Celda Solar.

Se especifica bajo condiciones estándar una temperatura de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m^2 (es lo normal que incide en la tierra), con una masa de aire espectral de 1,5 (AM 1,5). Esto corresponde a la irradiación y espectro de la luz solar incidente en un día claro sobre una superficie solar inclinada con respecto al sol con un ángulo de 41,81° sobre la horizontal. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

- **Temperatura de operación nominal.**

Temperatura de operación nominal de la celda, se define como la temperatura que alcanzan las celdas solares cuando se somete al módulo fotovoltaico a una irradiancia de 800 W/m² con distribución espectral AM 1,5 G, la temperatura ambiente es de 20 °C y la velocidad del viento de 1 m/s. (Todo sobre paneles fotovoltaicos, 2016)

- **Factor de llenado.**

Otro término para definir la eficacia de una celda solar es el factor de llenado o fill factor (FF), que se define como la relación entre el máximo punto de potencia (P_m) dividido entre el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y la corriente en cortocircuito (I_{sc}):

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{n * A_c * E}{V_{OC} * I_{SC}}$$

Ecuación 3.2 –Factor de llenado.

3.1.4 Estudio de Parámetros Eléctricos.

Las condiciones de funcionamiento de una celda fotovoltaica tales como la irradiación y la temperatura afectan directamente a la tensión, intensidad y potencia generada por la misma y es conveniente saber cómo afectan estas condiciones en el comportamiento de una celda solar.

Antes de continuar es necesario introducir dos conceptos fundamentales, estos son: tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito.

La tensión de circuito abierto **V_{oc}** es la diferencia de potencial que se alcanza cuando una celda fotovoltaica es iluminada, sin estar en conectadas las regiones P y N, siendo proporcional a la iluminación recibida. Este es el máximo valor de tensión de la celda.

La corriente de cortocircuito I_{sc} es aquella que se genera cuando las regiones P y N están unidas por un conductor exterior con una resistencia nula y es proporcional a la iluminación recibida. Este es el máximo valor de intensidad de la celda. (Ingelibre, 2015)

Las Figuras 3.1 y 3.2 representan los dos conceptos fundamentales mencionados anteriormente

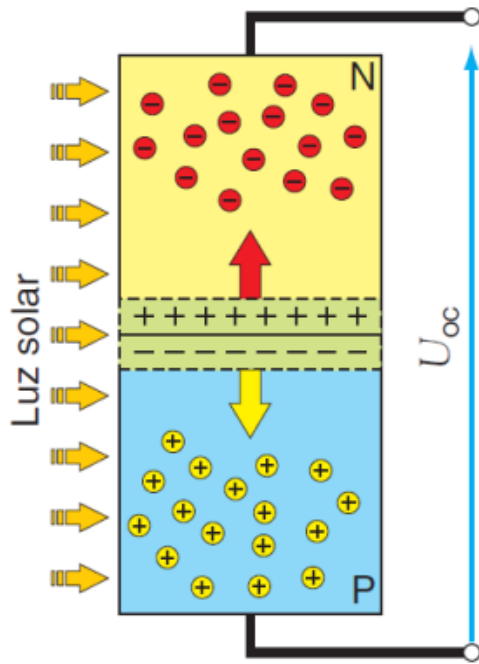


Figura 3.1 – Celda Fotovoltaica en Circuito Abierto.

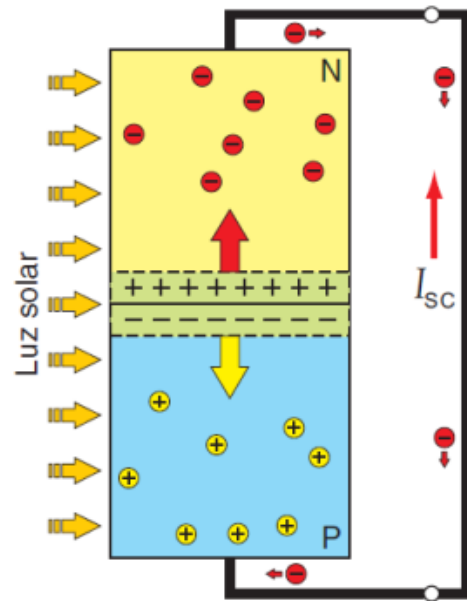


Figura 3.2 – Celda Fotovoltaica en Cortocircuito.

Una situación intermedia entre las dos imágenes anteriores sería un circuito donde las regiones P y N estuvieran unidas mediante un conductor y se encontrase una resistencia receptora. En tal caso, la tensión proporcionada por la celda fotovoltaica se podría obtener mediante ley de ohm ($V_L = I_L * R$). A mayor resistencia, el circuito se comportaría como un circuito abierto ($R=\infty$, $I=0$), y con una muy pequeña se comportaría como si estuviera en cortocircuito ($R=0$, $I=\infty$). La potencia suministrada por la celda se expresa mediante la siguiente ecuación 3:

$$P_L = V_L * I_L$$

Ecuación 3.3 – Potencia Suministrada.

Se cumple siempre que la intensidad I_L y la tensión V_L en el receptor son inferiores a la intensidad de cortocircuito I_{sc} y a la tensión de circuito abierto V_{oc} , respectivamente.

Cuando hablamos de la potencia máxima capaz de suministrar una celda fotovoltaica se suele utilizar ecuación 4 referente a una terminología:

$$P_{max} = V_{mpp} * I_{mpp}$$

Ecuación 3.4 –Potencia Máxima de Suministro.

Si representamos la intensidad y la potencia frente a la tensión generada por una celda a temperatura e irradiación constantes obtendremos las curvas características I-V o P-V, donde podremos ver cuál es la potencia máxima y extrapolar ese punto para obtener la intensidad en el punto de máxima potencia I_{mpp} y la tensión en el punto de máxima potencia V_{mpp} . Por lo cual conviene hacer trabajar a la celda fotovoltaica cerca de este punto.

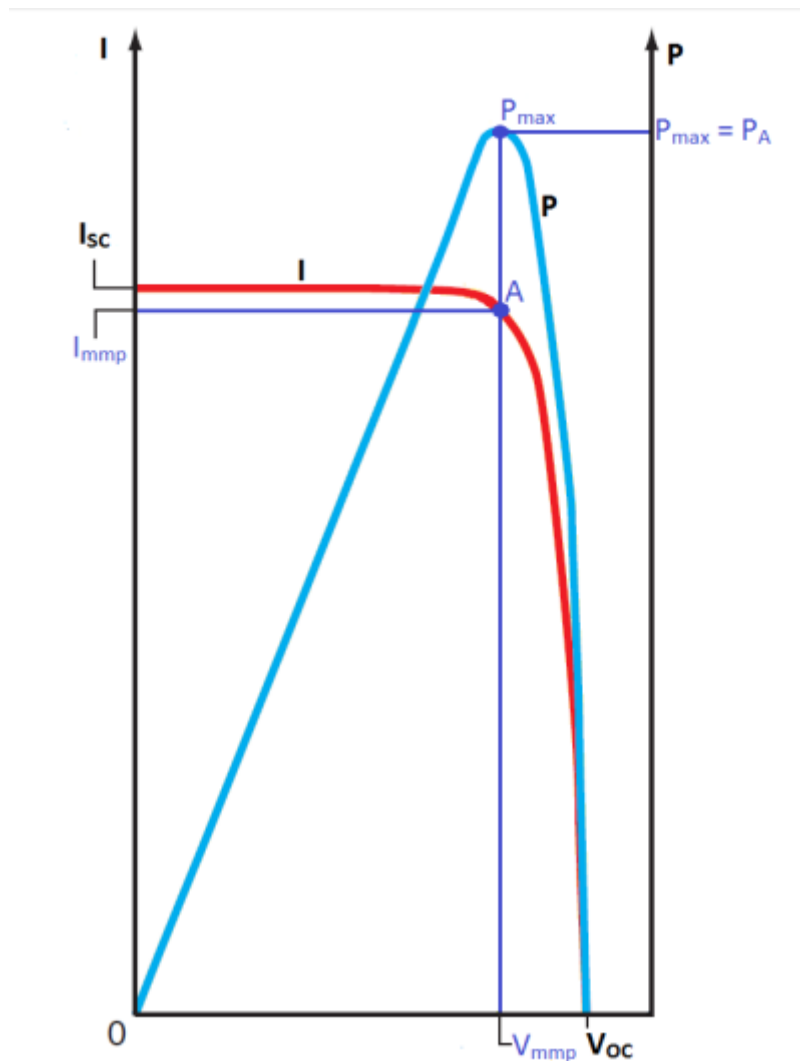


Figura 3.3 – Curvas de Parámetros Eléctricos.

Como se definió en un momento, la potencia máxima en condiciones estándar de medida (CEM) o Standard Test Conditions (STC), son: temperatura de la celda de 25°C, irradiancia 1000 W/m² y AM (masa de aire) 1,5, también se denomina potencia pico de la celda.

Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos escasamente operan en condiciones estándar. Las condiciones de funcionamiento son muy variables, pudiendo variar en un rango de 0 – 1000 W/m² en el caso de la irradiancia y temperatura de la celda hasta 50°C superando ampliamente la temperatura ambiental. (Ingelibre, 2015).

- **Efectos de la irradiancia**

La tensión y corriente que se genera en una celda solar depende directamente de la iluminación recibida. La corriente de cortocircuito de la celda es directamente proporcional a la irradiancia como se muestra en la Grafico 3.1, disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de circuito abierto varía poco con la irradiancia, aunque también decrece, a efectos prácticos se puede considerar constante. (Ingelibre, 2015)

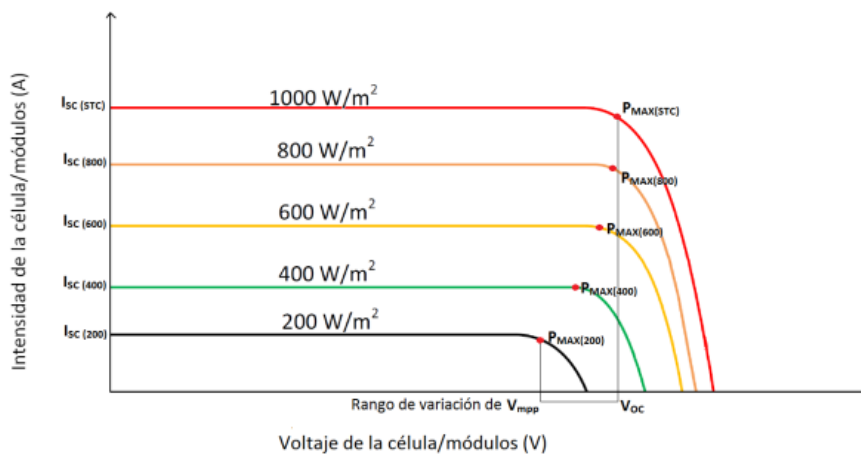


Grafico 3.1 – Efectos de la Irradiancia.

La intensidad de cortocircuito (I_{sc}), varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal acorde a la siguiente expresión:

$$I_{sc(G)} = G * \frac{I_{sc(CEM)}}{1000}$$

Ecuación 3.5 –Intensidad de Cortocircuito.

Dónde:

$I_{sc(G)}$: Intensidad de cortocircuito para una irradiación G (A)

$I_{sc(STC)}$: Intensidad de cortocircuito en condiciones estándar CEM (A)

G: Irradiancia (W/m^2)

- **Efecto de la temperatura**

Por otro lado, la temperatura afecta de manera considerable a la tensión, tal como se representa en el Grafico 3.2.

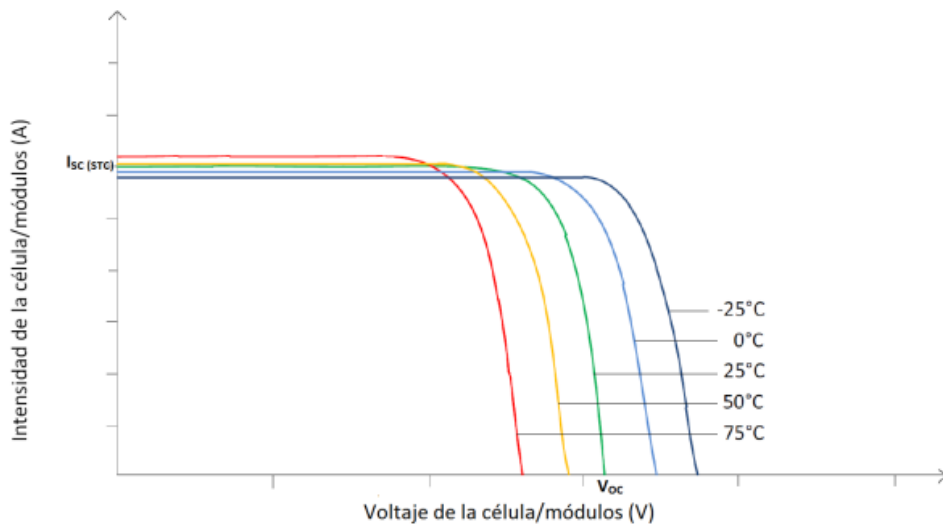


Grafico 3.2 – Efectos de la Temperatura (Intensidad vs Voltaje).

Como se aprecia la tensión de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura. La intensidad de cortocircuito, sin embargo, aumenta cuando crece la temperatura, aunque la variación es muy pequeña y a efectos prácticos se considera constante.

Es evidente que si la tensión de la celda fotovoltaica disminuye cuando aumenta la temperatura y la intensidad prácticamente se mantiene constante, la potencia entregada por la celda, disminuirá cuando aumente la temperatura de la celda. (Ingelibre, 2015). En el grafico 3.3 se muestra la comparación entre potencia y voltaje, cuando la celda es afectada por la temperatura.

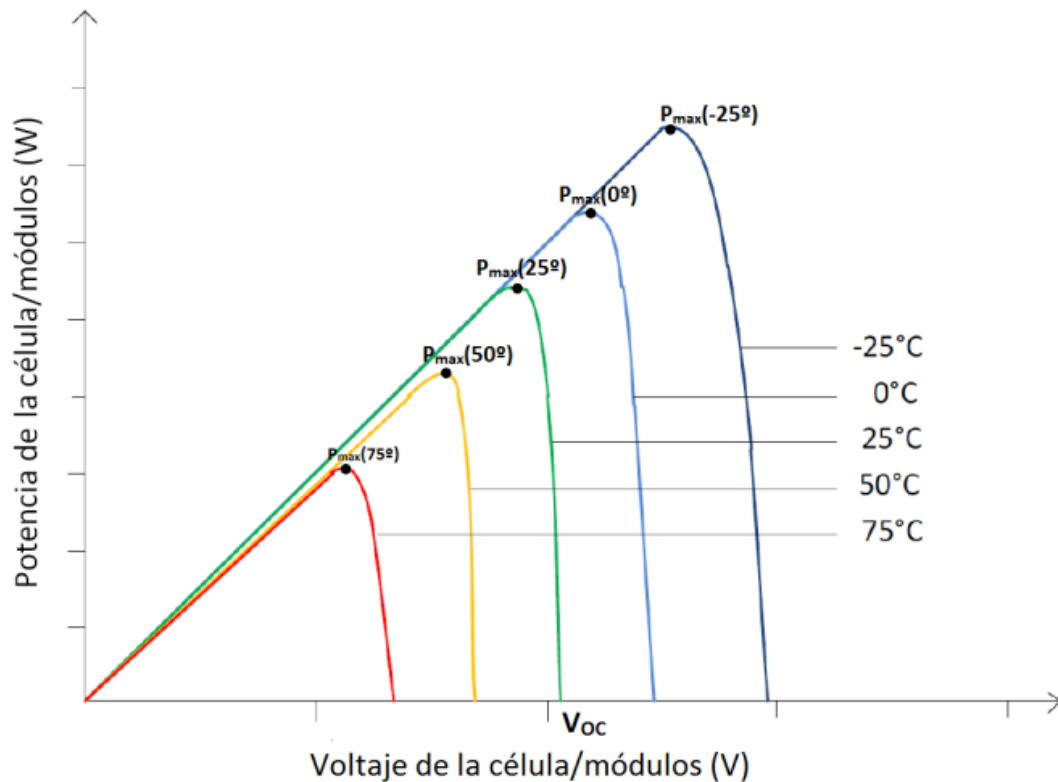


Gráfico 3.3 – Efectos de la Temperatura (Potencia vs Voltaje).

La temperatura de trabajo de una celda está íntimamente relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación, además se puede obtener mediante la siguiente ecuación 6:

$$T_c = T_a + G * \frac{TONC - 20}{800}$$

Ecuación 3.6 –Temperatura de Trabajo.

Dónde:

T_c: temperatura de trabajo de la célula (°C)

T_a: temperatura ambiente (°C)

TONC: temperatura de operación nominal de la célula (°C)

G: Irradiancia (W/m²)

El valor de la temperatura de operación nominal de la celda (TONC) es un parámetro que se obtiene de las hojas características de los módulos fotovoltaicos, toma valores que van de 43 a 49°C y si no se dispone de él se puede tomar 45°C como un valor razonable.

TONC corresponden a una irradiación determinada en el plano del módulo de 800 W/m², con orientación normal a la radiación incidente al mediodía solar, temperatura ambiente de 20°C, velocidad del viento de 1 m/s y funcionamiento en circuito abierto. (Ingelibre, 2015).

3.2 Análisis y Estudio de un Aerogenerador Eólico.

Un aerogenerador eólico es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica. Hoy en día, casi la totalidad de las turbinas eólicas son del tipo eje horizontal y de tres aspas.

3.2.1 Principio de Funcionamiento.

El funcionamiento de las antiguas turbinas eólicas era de modo similar a los molinos de viento, basaba su principio de funcionamiento en la resistencia que ofrecían las palas frente a la acción del viento. Este modelo no era aerodinámico y conducía a un rendimiento de conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje de la máquina muy pequeño, con valores cercanos al 12%. Las turbinas modernas funcionan bajo el principio de la fuerza de sustentación que se desarrolla en la pala debido a su diseño aerodinámico, de modo similar al ala de un avión. El avance en el diseño aerodinámico y estructural de las palas, ha permitido incrementar el rendimiento de conversión a valores cercanos del límite teórico.

La obtención de la potencia de un aerogenerador, se consigue convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y de la velocidad del viento.

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. Por lo tanto la energía cinética del viento depende de la densidad del aire. A presión atmosférica normal y a 15°C la densidad del aire es 1,255 Kg/m³ aunque éste valor disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

En referencia al área de barrido de las palas, ésta determina cuanta energía del viento es capaz de capturar el aerogenerador. A mayor diámetro de palas, la superficie es mayor y por lo tanto la energía que absorbe el rotor es mayor.

La velocidad del viento es un parámetro muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad. A mayor velocidad de viento, la energía que capte el aerogenerador es mayor.

La energía cinética del viento es capturada por el aerogenerador gracias a las palas de rotor. Cuando el viento incide contra las palas, ésta giran en torno el eje del rotor y por lo tanto hacen girar el eje de baja velocidad al que está acoplado el buje. Éste gracias al multiplicador hace girar el eje de alta velocidad al que está acoplado el generador, que es el productor de energía eléctrica. (Zulueta y Gonzalez, 2014)

3.2.2 Sistemas Principales de los Aerogeneradores.

Los aerogeneradores eólicos se componen de una variedad de sistemas necesarios e importantes para su funcionamiento, dentro de estos sistemas se encuentran:

- **Sistema de Captación:**

Tiene como misión transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Este sistema se compone fundamentalmente por:

- 1) Rotor: Incluye el buje y las palas.
- 2) Buje: Une las palas solidarias al eje lento. Está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
- 3) Palas: Elementos que capturan la energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje. Las palas pueden ser de dos tipos:
 - a) Paso Fijo: En este tipo de palas su posición permanece invariable. Para esta clase de sistemas, cuando la velocidad del viento excede un determinado valor y se hace necesario limitar la energía capturada, el perfil de la pala entra en pérdida aerodinámica provocando turbulencias que mantienen dentro de unos márgenes la energía extraída.

- b) Paso Variable: Aquellas que modifican su posición, es decir, el ángulo que forma el perfil de la pala con la corriente de aire incidente en la misma. Permiten controlar la energía mecánica suministrada al aerogenerador modificando este ángulo.

- **Sistema de Transmisión:**

Transmite la energía mecánica conseguida en el eje del generador para producir energía eléctrica o trabajo mecánico. Este sistema se compone principalmente por:

- 1) Eje Lento: El eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. Por el interior, discurren conductos del sistema hidráulico o eléctrico, para accionamiento de los frenos aerodinámicos, del paso variable y del control de los sensores del rotor.
- 2) Multiplicador: A su entrada se encuentra el eje de baja velocidad, y mediante un sistema de engranajes, consigue que el eje de salida, de alta velocidad, gire a mayor frecuencia (entre 80 y 50 veces más rápido, dependiendo del modelo de la turbina).
- 3) Eje de Alta Velocidad: Gira aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico, además está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia.

- **Sistema de Orientación:**

Este tipo de sistemas sólo se utiliza en los aerogeneradores de eje horizontal para situar el rotor en la dirección del viento. Este sistema se compone primordialmente por:

- 1) **Motores de Giro:** En las turbinas eólicas grandes, es necesario un mecanismo que las posicione enfrentadas al viento. Este movimiento circular, se consigue con unos motores y reductores fijos a la góndola que engranan en un dentado de la parte superior de la torre, llamada corona de orientación. La señal de posicionamiento correcta la recibe del controlador de la turbina, a partir de las lecturas de la veleta y del anemómetro instalado en cada aerogenerador.
- 2) **Freno de Orientación:** Tienen como misión evitar desplazamientos radiales de la góndola no deseados, bien por efecto del viento incidente o por giro del rotor. Asimismo, reducen el desgaste de los engranajes de orientación. Su accionamiento puede ser hidráulico o eléctrico, actuando en pinzas de freno o motor eléctrico respectivamente.

- **Sistema de Generación:**

En este sistema se convierte la energía mecánica en energía eléctrica y es el encargado distribuir dicha electricidad. Este sistema se compone básicamente de:

- 1) **Generador Eléctrico:** Son los elementos de la turbina encargados de convertir la energía mecánica (en forma rotatoria) en energía eléctrica. La electricidad producida en el generador se conduce hasta la base de la torre, donde es transformada (elevación de tensión y reducción de intensidad) y enviada a la red.

- 2) Cableado de Potencia: Transporta la energía eléctrica generada desde el alternador hasta el transformador del fuste, pasando por las distintas protecciones de máxima o mínima tensión, sobre intensidad o frecuencia, evitando así posibles daños a la red o a la propia turbina en caso de producirse contingencias en el aerogenerador o red de distribución.
- 3) Transformador Interno: Eleva la tensión de generación desde los 690V o 1.000 V (en función del aerogenerador) hasta 20 kV, reduciendo la intensidad y con ello las pérdidas eléctricas y el calentamiento del cableado.

- **Sistema de Control:**

Tiene como función supervisar, controlar y regular el aerogenerador dependiendo de las condiciones necesarias. Este sistema se compone de:

- 1) Controlador de Turbina: El controlador continuamente supervisa las condiciones de la turbina eólica, recoge estadísticas de su funcionamiento y regula interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y demás elementos del aerogenerador.
- 2) Sensores de Control: Se utilizan para medir los parámetros físicos de funcionamiento y supervisión de la turbina. Las señales electrónicas son utilizadas por el controlador electrónico para conectar el aerogenerador cuando la señal recibida es correcta. El controlador parará el equipo automáticamente si la información recibida de los sensores es errónea, con el fin de proteger la turbina.
- 3) Señales de Control y Regulación: Desde el controlador de turbina, en base al análisis de la información de los sensores, se generan órdenes que afectan a la operación y funcionamiento del aerogenerador.

- **Sistema de Soporte:**

Tiene como objetivo mantener en pie la estructura, con los cimientos y ejes adecuados. Se compone principalmente de:

- 1) Torre: Soporta la góndola y el rotor. Puede ser tubular o de celosía (estas últimas, aunque más baratas, están en desuso ya que las tubulares son mucho más seguras). Tienen varias secciones para facilitar el transporte. La unión de los distintos tramos se realiza mediante pernos en las bridas de unión.
- 2) Cimentación: Es la parte que permite mantener la verticalidad de la estructura. Su misión es absorber las tensiones del resto de la estructura y transmitirlos al terreno.

- **Sistema Hidráulico:**

Este sistema es uno de los más importantes, debido a que es el encargado de abastecer de presión a otros sistemas. Este sistema se compone de:

- 1) Grupo de presión: Se encarga de suministrar fluido hidráulico a una presión determinada para permitir el accionamiento de sistemas de captación, orientación o transmisión.
- 2) Conductos Hidráulicos: Canalizan el fluido hidráulico hasta el punto de utilización.
- 3) Válvulas de Control: Adaptan la presión y caudal del fluido en base al actuador a accionar.

3.2.3 Estrategias de Funcionamiento.

- **Arranque del aerogenerador:**

Cuando la turbina detecta viento en cualquier dirección, por los sensores de velocidad de viento (anemómetros de turbina), el controlador realiza las siguientes órdenes al aerogenerador, a través de los motores correspondientes:

- 1) Entre 2 - 3 m/s: Envía la orden de posicionarse frente al viento. Esta orden se denomina orientación de la turbina.
- 2) A partir de 3 m/s: La orden de desaplicar frenos para permitir el giro de la turbina y comenzar a girar por el efecto únicamente del empuje del viento.
 - 2.1) Paso Variable: Además envía la consigna de posición de las palas progresivamente de 90° - 0° .
- 3) Rpm \geq 1500: Al llegar a la velocidad de sincronismo del generador solicitado (dependiendo del viento, se selecciona un generador u otro con velocidades diferentes), se conecta el generador a la red de forma suave, contando para ello con electrónica de potencia mediante tiristores (un tipo de interruptor continuo de semiconductor, que puede ser controlado electrónicamente). Al realizar la conexión (dura entre 3 y 4 segundos), se conecta directamente el generador a red, mediante un interruptor.
- 4) Conexión directa a la red: A partir de este momento, el generador queda conectado directamente a la red eléctrica general, enviando la energía al sistema nacional. La velocidad es constante y limitada únicamente por la frecuencia de la red.

- 4.1) Paso Fijo: Cuando el viento es demasiado elevado, el diseño aerodinámico de las palas de paso fijo incrementa las turbulencias del flujo de aire, limitando con ello la potencia.
- 4.2) Paso Variable: El control del aerogenerador se realiza mediante la actuación en el ángulo de paso, capturando o limitando la potencia extraída del viento. La velocidad de generación puede ser variable.
- 5) En turbinas de doble devanado: La finalidad es optimizar la energía generada para diferentes rangos de velocidad de viento, seleccionándose un generador u otro en función del mismo.

- **Parada del aerogenerador:**

Puede ocurrir por los siguientes motivos:

- 1) Vientos altos: Cuando el viento supera un margen (>25 m/s o 90 km/h), o bien cuando un error es detectado en base a la lectura de los sensores de viento.
- 2) Error de funcionamiento: Se detecta un error de funcionamiento mediante la información de los sensores.
- 3) Parada por poco viento: Se inicia la secuencia si se detecta poca generación o vientos muy bajos.
- 4) Parada Manual: Se realiza bajo la supervisión del personal de operación y mantenimiento.

En la parada de la turbina se distinguen los siguientes procedimientos:

- 1) Parada de Emergencia: Se produce ante errores importantes, peligro para personas o integridad de la turbina. Se aplican frenos con la máxima presión desde el primer momento.
- 2) Cambio devanado generador: No se llega a realizar una parada, sólo una disminución de la velocidad de giro en el caso de pasar del generador grande al pequeño. En el caso contrario, la turbina se desacopla y permite el embalamiento con el viento hasta alcanzar la nueva velocidad de sincronismo.
- 3) Parada Suave.
 - 3.1) Paso fijo: El controlador envía una orden al sistema de captación para desplegar los Aero frenos, simultáneamente desconecta el generador, revisa la disminución de las rpm y emplea los frenos de forma suave. Al cabo de varios segundos, aplica una presión de frenada cada vez mayor hasta conseguir la detención total.
 - 3.2) Paso Variable: La orden la envía a los actuadores del calaje de palas (pitch) aumentando los grados hasta los 90°. Simultáneamente desconecta el generador y realiza de igual forma un incremento paulatino de presión en el circuito secundario de frenada.

3.2.4 Estudio de Parámetros Eólicos.

3.2.4.1 Energía del Viento

El viento es un recurso variable a lo largo del tiempo, dependiendo de la localización y condiciones meteorológicas. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

La potencia asociada a la energía del viento que atraviesa una superficie (A) está dada por la ecuación (7):

$$P_o = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Ecuación 3.7 – Potencia del Aire.

Dónde:

P_o: Potencia del aire en vatios (W)

p: Densidad del aire en kilogramos por metro (Kg/m)

A: Área del barrido de las palas por metro cuadrado (m²)

v: Velocidad del viento en metros por segundo (m/s)

La potencia vinculada en este punto, depende netamente en la densidad, la velocidad y el área penetrada por el viento.

3.2.4.2 Densidad del viento.

La densidad del aire presenta variaciones en función de factores como la temperatura, humedad y presión. En el siguiente grafico 3.4, se aprecia el porcentaje de variación de la potencia eólica en relación a la temperatura y a la presión. Donde se ha tomado condiciones estándar como una temperatura de 25C y 1 atm de presión en donde la densidad del aire es de 1,185 kg/m³.

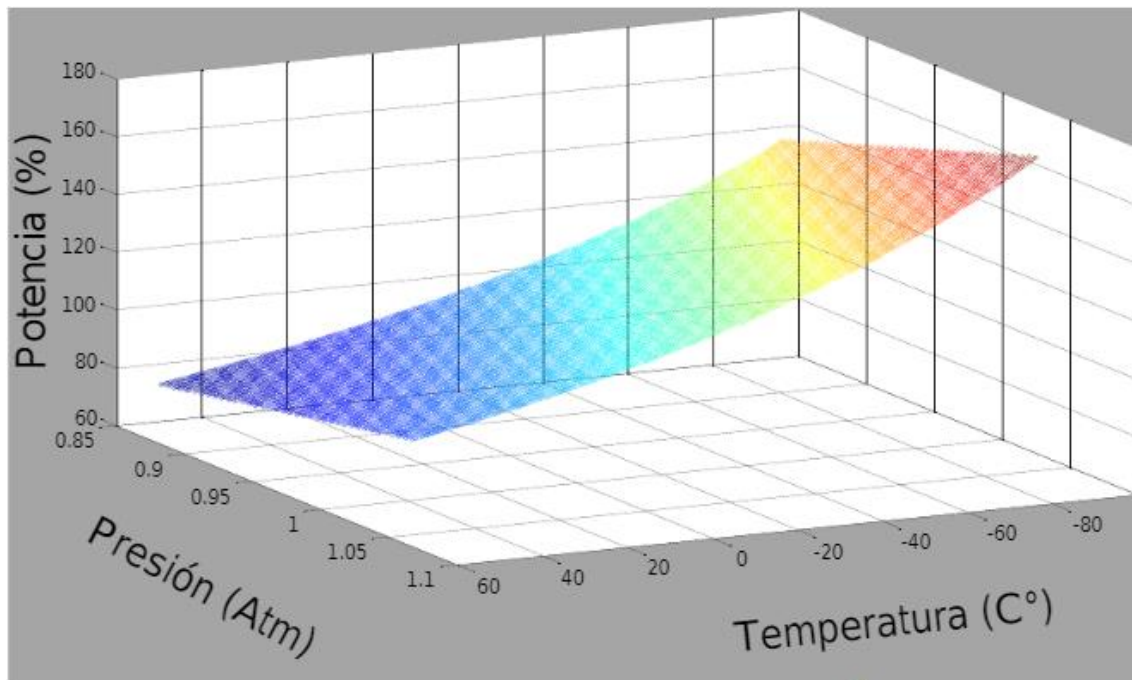


Grafico 3.4 – Factores de Densidad.

Según aumenta la temperatura, la densidad del aire disminuye por lo que en climas cálidos, a igualdad de velocidad de viento, la energía eólica disminuye. Mientras que, al disminuir la presión, la densidad del aire disminuye. Mientras más alto, menor es la presión del aire, por lo que en lugares elevados la energía eólica es menor. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

3.2.4.3 Tamaño de aspas del Aerogenerador.

A lo largo de los años se ha ido incrementando el tamaño de los aerogeneradores, debido a que mientras más grande sea esta estructura más energía eólica es capaz de generar. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

La siguiente ecuación define el cálculo asociado:

$$A = \pi * r^2$$

Ecuación 3.8 – Área del Aerogenerador.

Donde r es el radio de las palas en metros (m).

En la siguiente Figura 3.3 puede verse representada la altura en metros a la que se instalan los aerogeneradores, además de la potencia en kW y el área que barren sus palas en m2.

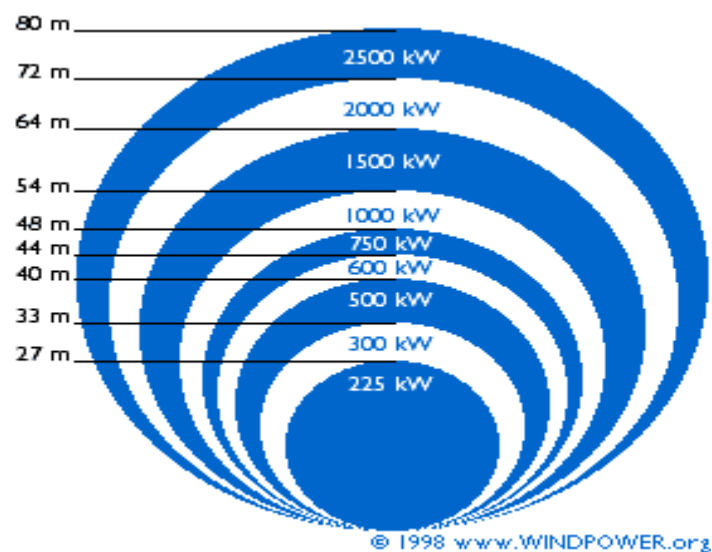


Figura 3.4 – Representación de Aerogeneradores.

3.2.4.4 Velocidad del Viento.

Los aerogeneradores se buscan instalar en lugares con buenas características de viento anual, debido a que son lugares donde se produce mayormente potencia gracias a las velocidades del viento. Como se definió en la ecuación 7.

Para estimar la capacidad eólica de un sitio, se utilizan comúnmente modelos estadísticos determinados. Uno de ellos es la distribución de *Weibull* que trata de representar adecuadamente la probabilidad de cada velocidad de viento en un periodo específico. La ecuación 9 representa la probabilidad del viento para un tiempo determinado. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

$$P_{Weibull}(v) = \frac{k}{C} * \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}$$

Ecuación 3.9 –Distribución de Probabilidad Eólica.

Dónde:

P_{Weibull} (v): Distribución de la probabilidad de la velocidad del viento (v) para un extenso periodo de tiempo.

C: Es un parámetro de escala.

k: Es un parámetro de forma.

v: Es un parámetro de viento.

Cuando se utiliza ecuación 9 para calcular la distribución de Weibull, con el fin de determinar un lugar específico para la implementación conviene distinguir dos conceptos relevantes, la velocidad del viento más probable del lugar calculado y por otro lado la velocidad media del sitio.

En el grafico 3.5 se puede visualizar los conceptos mencionados.

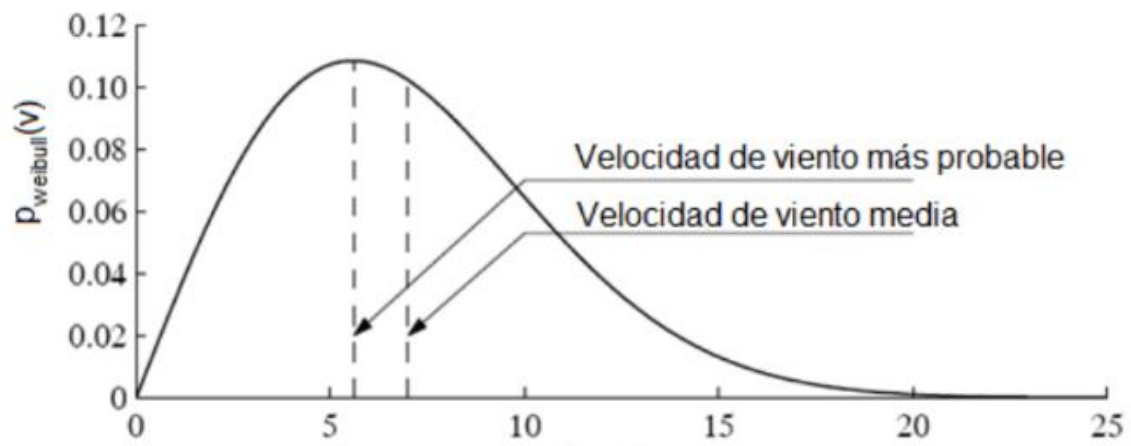


Grafico 3.5 – Factores de Velocidad.

Para enfocarse en un lugar específico existen atlas eólicos que permiten estimar la energía en función de las curvas del aerogenerador.

Otro aspecto importante es la variación del viento, que se ve afectada dependiendo la altura y características del terreno. Para calcular la velocidad del viento en una altura específica se tienen las ecuaciones 10 y 11, correspondientes a un perfil logarítmico y exponencial respectivamente. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

$$V(z) = V(z_r) * \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

Ecuación 3.10 – Velocidad en Función de la altura 1.

$$V(z) = V(zr) * \left(\frac{z}{zr}\right)^{\alpha}$$

Ecuación 3.11 – Velocidad en Función de la altura 2.

Dónde:

V (z): Velocidad del viento a la altura Z.

z: Altura sobre el suelo.

zr: Altura de referencia sobre el suelo para montar el perfil..

z0: Longitud de rugosidad.

α : Exponente o potencia elevada.

3.2.4.5 Aerodinámica.

La potencia capturada por el viento por parte del aerogenerador se define en la ecuación 12 como:

$$P(t) = \frac{1}{2} * p * \pi * r^2 * v(t)^3 * C_p(A, \beta)$$

Ecuación 3.12 – Potencia del Aerogenerador.

Dónde:

P (t): Potencia del aerogenerador en el instante t.

t: Tiempo.

p: Densidad del Aire.

r: Radio de la pala desde la punta hasta el rotor.

v (t): Velocidad del viento en el instante t.

C_p (A, B): Coeficiente aerodinámico de potencia que depende de A y B.

A: Ratio de velocidad en la punta de la pala

B: Angulo pitch.

Los fabricantes industriales de aerogeneradores proveen el coeficiente aerodinámico de potencia C_p como función que depende del ratio de velocidad en la punta de la pala A y el ángulo B. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

El ratio de velocidad en la punta de la pala A, se define como se representa en la ecuación 13:

$$A(t) = \frac{w(t) * r}{V(t)}$$

Ecuación 3.13 –Velocidad en Punta de Pala.

Dónde:

w (t): Velocidad angular de las palas en el instante t.

r: Radio de la pala desde la punta del rotor.

v(t): Velocidad del viento en el instante.

3.2.4.6 Tren de Potencia.

Es el conjunto de elementos que transmite el torque desde las palas hasta el generador. Estos elementos son principalmente, el cojinete principal, el eje lento, la caja de cambios y el eje rápido. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

La transmisión del torque a través de estos elementos se define en la ecuación 14 como:

$$T_w(t) - T_{em}(t) = c * w(t) + I_T * \frac{dw(t)}{dt}$$

Ecuación 3.14 –Tren de Potencia.

Dónde:

Tw (t): Torque generado por el viento en el instante t.

Tem (t): Torque absorbido por el generador eléctrico en el instante t.

c: Coeficiente de amortiguamiento en el tren de potencia.

w (t): Velocidad angular en las palas en el instante t.

IT: Inercia total del sistema.

La inercia del sistema la definimos en la ecuación 15 como:

$$I_T = I_a * I_b * i_g$$

Ecuación 3.15 –Inercia Total.

Dónde:

It: Inercia total del sistema.

Ia: Suma de las inercias de las palas, el buje el eje lento y parte de la reductora.

Ib: Inercia del eje rápido, el generador eléctrico y la otra parte de la reductora.

ig: Es el ratio de reducción de la reductora. Relación de giro entre el eje rápido y lento.

3.2.4.7 Máquina Eléctrica.

Existen diferentes tipos de máquinas eléctricas pero desde el punto de vista de las estrategias de control, una maquina eléctrica puede modelarse como un sistema de primer orden, donde se relaciona el torque demandado por el generador eléctrico y el torque generado por el giro de las palas. (Zulueta y Gonzalez, 2014).

Esta relación se define en la ecuación 16 como:

$$\frac{dT_{em}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} * (T_d(t) - T_{em}(t))$$

Ecuación 3.16 –Máquina Eléctrica.

Dónde:

Tem (t): Torque absorbido por el generador eléctrico en el instante t.

Td (t): Torque demandado o consigna de par.

t: Constante de tiempo.

3.3 Análisis y Estudio de un Sistema de Control de Temperatura Industrial.

Un sistema de control está construido por un conjunto de componentes que regulan el comportamiento de un sistema o de sí mismo, para lograr un objetivo determinado. Los objetivos principales de los sistemas de control constan en ser estables y robustos frente perturbaciones y errores, además de ser eficientes según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.

En un sistema de control de temperatura el concepto anterior se cumple, teniendo como objetivo mantener una temperatura constante en una aplicación determinada.

Cabe resaltar que en esta parte de la memoria se estudia y analiza los sistemas de control de temperatura en ámbito general, ya que la memoria no se enfoca en un control de temperatura específico sino en las potencias asociadas a estos procesos, dando más énfasis en los estudios anteriores sobre las energías renovables utilizadas.

3.3.1 Principio de Funcionamiento.

Un control de temperatura consiste en mantener controlada una temperatura específica en un proceso determinado, donde independiente del control de temperatura a controlar, el funcionamiento básico es el mismo.

Los controles de temperatura son principalmente sistemas de lazo cerrado donde se determina una constante de entrada representando el set point deseado para el sistema. Este valor ingresado por el usuario o programador actúa en el sistema y se tiene una retroalimentación, la cual evalúa el valor deseado y lo compara con el valor real del proceso, produciendo así una corrección en el proceso y disminuyendo el error.

Estos sistemas constan con diferentes tipos de perturbaciones, donde generalmente los factores principales son el entorno, material, temperatura ambiente, entre otras. Independiente de la perturbación en el sistema, se debe ser capaz de llegar al valor deseado o set point, donde habitualmente esto se ve reflejado en la potencia del sistema, aumentando o disminuyendo dependiendo la situación.

Un elemento de suma importancia para un control de temperatura es el sensor a utilizar, ya que es el encargado de censar la temperatura del proceso y enviar la señal obtenida al comparador para verificar la temperatura del sistema. (A.Aponte Castro, 2015)

3.3.2 Descripción de Conceptos y Componentes.

Se realizara una descripción de conceptos fundamentales, que se deben saber y comprender en esta parte de la memoria sobre los sistemas de control, tales como:

- **Sensor:** Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas llamadas variables de instrumentación, y transformarlas a variables eléctricas. El sensor puede ser integrado o separado con otros elementos de un lazo de control y se asocia a variables analógicas.
- **Actuador:** Es un dispositivo mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o actuar otro dispositivo mecánico. Dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina neumático, hidráulico o eléctrico.
- **Amplificación:** Es la capacidad para aumentar de tamaño una señal eléctrica, ya sea en forma de corriente o voltaje para entregarla a una carga con más energía de la que tenía originalmente.
- **Autómata:** Equipo electrónico programable en lenguaje no informático y diseñado para controlar, en tiempo real y en ambiente industrial, procesos secuenciales.

- **Controlador:** Instrumento que realiza la función de controlar y puede ser integrado con otros elementos funcionales de un lazo de control.
- **Variable Controlada:** Una variable que está bajo control cuando evoluciona de una manera previamente definida.
- **Temperatura:** La temperatura es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura). La temperatura está relacionada con la energía interior de los sistemas termodinámicos, de acuerdo al movimiento de sus partículas, y cuantifica la actividad de las moléculas de la materia: a mayor energía sensible, más temperatura.
- **Set point:** Una señal de entrada, que coloca el valor deseado de una variable bajo control. El set point puede ser colocado en forma manual, automática o programada.
- **PID:** Es un mecanismo de control por retroalimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del controlador PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral y el derivativo.

3.3.3 Controlador PID.

El controlador PID es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

El controlador PID es suficiente para resolver los problemas de control de muchas aplicaciones en las industrias, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite.

La utilidad de los controles PID consisten en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles y beneficiosos. En el campo de sistemas para el control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, aunque tal vez en muchas situaciones específicas no aporten un control óptimo. (A.Aponte Castro, 2015).

Se puede mostrar empíricamente que el llamado “controlador PID” es una estructura útil. Dentro de la banda proporcional el comportamiento del algoritmo PID se puede escribir como se muestra en la ecuación 17:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ecuación 3.17 – Algoritmo PID.

Donde “ u ” es la variable de control y “ e ” es la variable de error. De esta manera, la variable de control es una suma de tres términos: el término P, que es el proporcional del error; el término I, que es la proporcional a la integral del error. Los parámetros del controlador son: la ganancia proporcional K , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d .

A continuación la Figura 3.5 hace referencia a un esquema general de control de temperatura con control PID y retroalimentación.

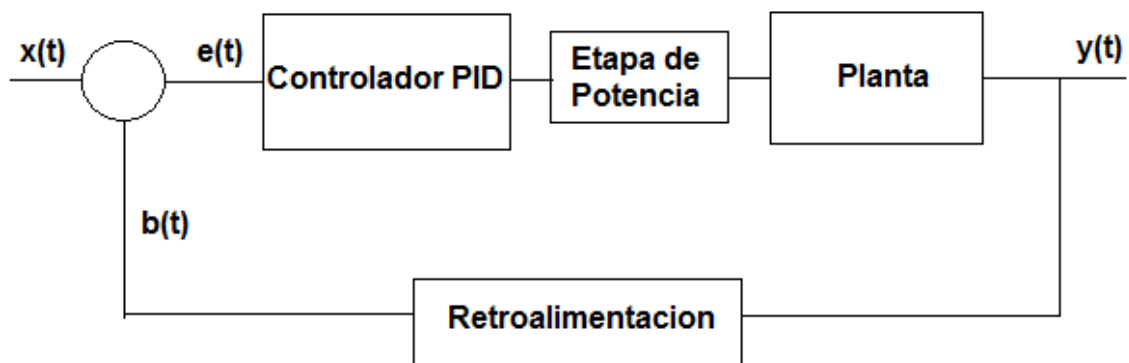


Figura 3.5 – Esquema Representativo de Sistema de Control de Temperatura.

Capítulo 4: Simulaciones y Estudio de Resultados.

Este capítulo se enfoca en realizar simulaciones sobre un sistema de panel solar, un sistema de un aerogenerador eólico y por otro lado una simulación sobre un control de temperatura, con el fin de fusionar ambos sistemas de energías renovables para poder controlar y auto sustentar el sistema de control de temperatura. Por otra parte, los resultados de este capítulo se centran en analizar diferentes potencias para control de temperatura y ver la factibilidad de implementación de los sistemas híbridos solar y eólico, asociando el costo de implementación que se tendría para abastecer distintas potencias y el ahorro en consumo energético que se genera mediante la implementación de estos sistemas.

4.1 Simulaciones.

Las simulaciones realizadas se enfocan principalmente en analizar, estudiar y conocer a mayor profundidad el funcionamiento de los distintos sistemas trabajados, con el objetivo de comprender de mejor forma el proceso asociado.

4.1.1 Simulación de Celda y Módulo Fotovoltaico.

La realización de una celda fotovoltaica en Simulink contiene diferentes componentes, así como: resistencia, constante, conversores, celda solar, sensor de voltaje y sensor de corriente. Los componentes utilizados en la implementación se detallan y visualizan en la Figura 4.2 correspondiente a la simulación de una celda fotovoltaica.

En la simulación de la celda fotovoltaica se instala una constante de entrada de señal física (constante PS), que representa la cantidad de irradiación o energía solar absorbida por el sistema. La señal simulada se conecta a un bloque de celda solar, que consiste en transformar la irradiación solar absorbida en energía eléctrica. Internamente el bloque consiste en una combinación en paralelo de una fuente de corriente, dos diodos exponenciales y una resistencia (R_p), que están conectados en serie con una resistencia R_s .

En la Figura 4.1 se detalla el diagrama de bloques internos de una celda solar.

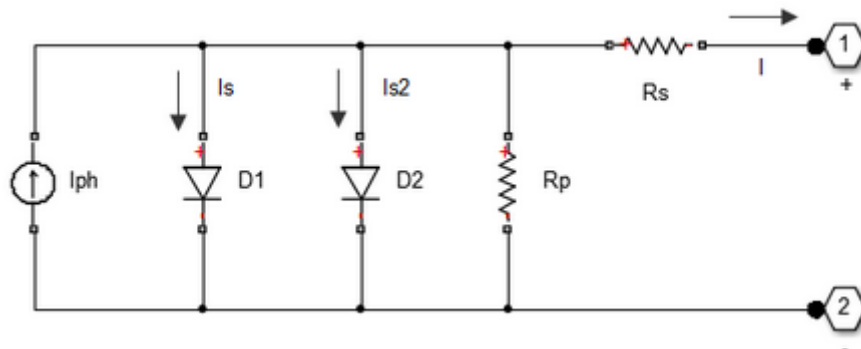


Figura 4.1 – Diagrama Interno Bloque de Celda solar.

La salida negativa de la celda solar, se conecta a un componente GND, que emula una señal de salida a tierra del sistema, mientras que la salida positiva del bloque representa una señal de energía eléctrica provocada por la celda solar y se conecta a la entrada de un sensor de corriente ideal.

El sensor de corriente ideal es un dispositivo que convierte la corriente medida en cualquier rama eléctrica en una señal física proporcional a la corriente. En esta parte el sensor adquiere la señal física resultante y la abastece a un sensor de voltaje ideal, que es un componente que transforma el voltaje medido entre cualquier conexión eléctrica en una señal física proporcional a la tensión, este módulo se conecta a un bloque GND referente a la simulación de tierra.

Paralelamente entre los sensores de corriente y voltaje ideal, existe una salida "I", que se asocia a un puerto de señal física, lo cual mediante conversores PS-Simulink, se extrae información numérica del sistema. Para visualizar los parámetros de corriente y voltaje simulados se instalan Displays en el circuito.

Adicionalmente a través de un bloque de producto, se multiplican las señales de voltaje y corriente, para así obtener la potencia proyectada en el proceso.

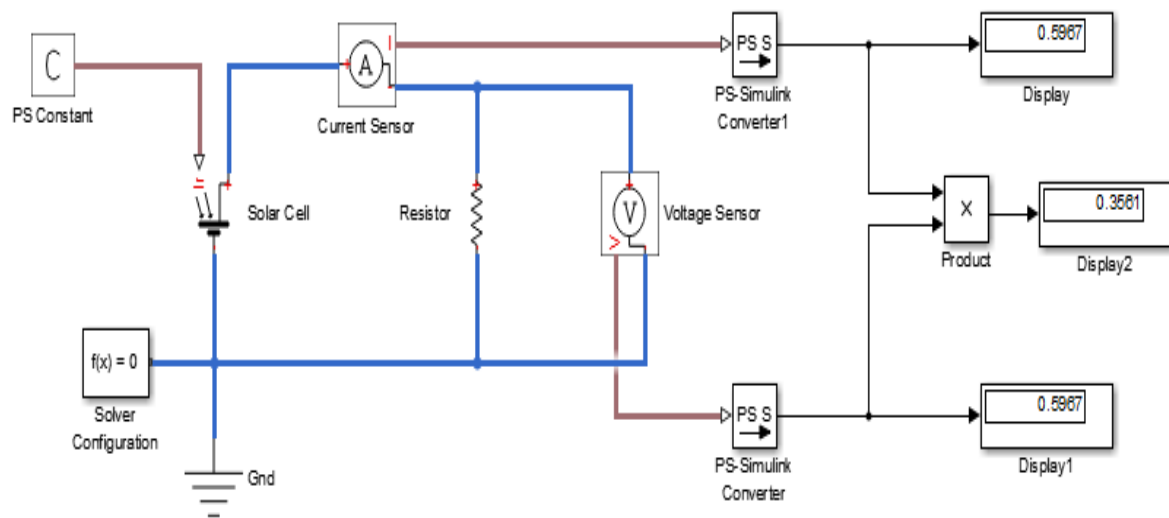


Figura 4.2 – Simulación de una Celda Solar en Simulink.

La implementación de un módulo solar en Simulink se compone de una variedad de funciones y elementos, tales como: resistencias, constantes, ganancias, además de módulos de corriente, voltaje y temperatura entre los más importantes. Los componentes utilizados en la implementación de un módulo solar se detallan y visualizan en la Figura 4.3 referente a la simulación de un módulo fotovoltaica.

Para comprender el funcionamiento de un módulo fotovoltaico se debe comprender la descripción anterior asociada a una celda fotovoltaica, ya que un módulo solar es la unión de varias celdas solares, por lo cual el principio de funcionamiento es el mismo.

La simulación de la Figura 4.3 consta con diferentes bloques de Simulink, donde la característica principal de esta simulación es que incorpora un bloque en el cual se ingresa el número de celdas fotovoltaicas que se desean tener en el módulo solar. Obteniendo de este modo todo lo vinculado a voltaje, corriente y potencia con dicha cantidad simulada.

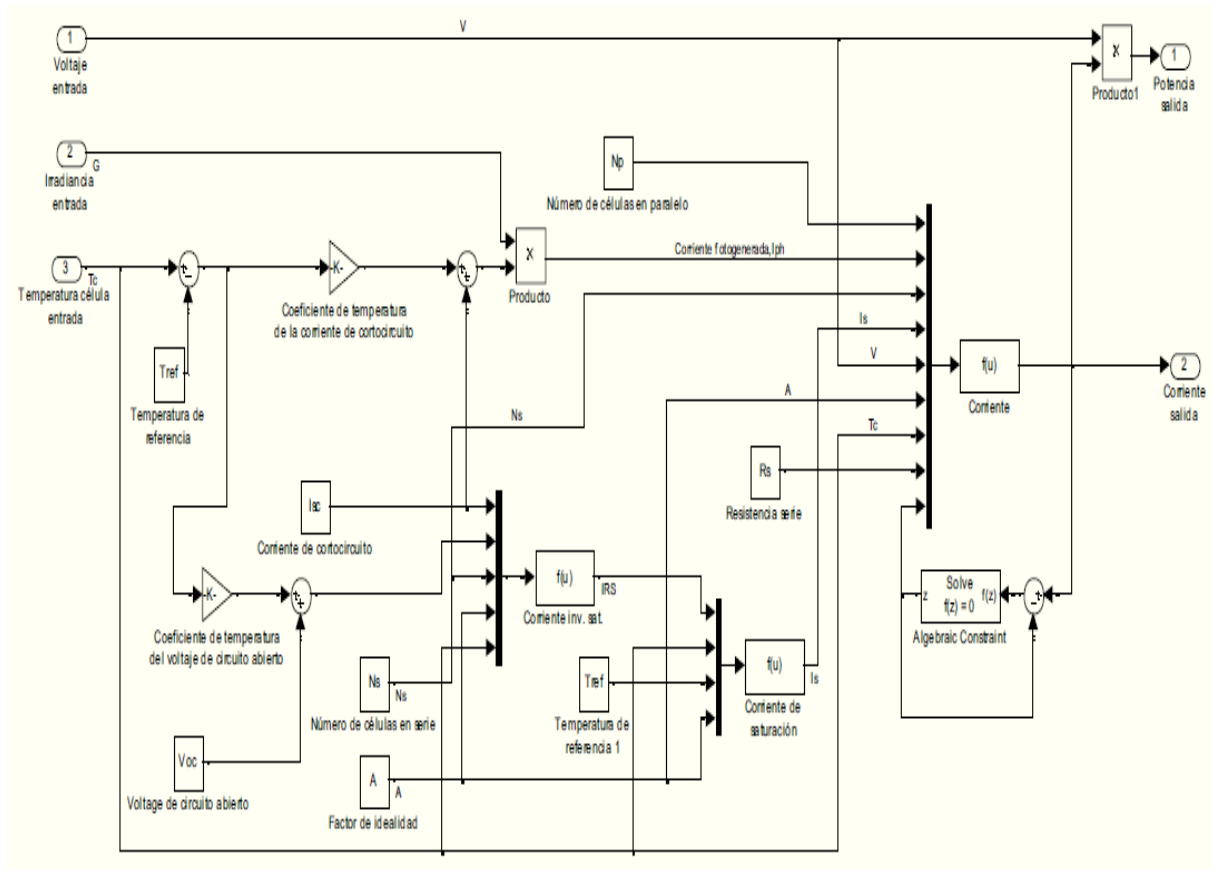


Figura 4.3 – Simulación de un Módulo Solar en Simulink.

4.1.2 Simulación de Aerogenerador Eólico.

Para establecer un aerogenerador eólico en Simulink es necesario contar con dos principales elementos, como son: constantes y subsistemas, con el fin de representar de mejor forma el funcionamiento de este proceso. La Figura 4.4 señala la implementación de un aerogenerador eólico en Simulink.

En la simulación de un aerogenerador eólico se establece una constante de entrada (1) que representa la velocidad del viento. La velocidad provocada por el viento es la que se encarga de generar el movimiento aerodinámico del rotor para así originar la elevación de los voltajes del aerogenerador, por lo que se constituye un primer subsistema que representa las velocidades asociadas a la aerodinámica del rotor. La sigla V en el subsistema representa la velocidad de entrada provocada por el viento, mientras que V_{elf} y V_{sim} son velocidades de salida emitidas por este fenómeno.

La velocidad de salida V_{sim} abastece a un segundo subsistema encargado de representar el torque mecánico generado por el viento, el cual mediante la velocidad provocada en el primer subsistema y el torque mecánico representado, simula la potencia emitida por el aerogenerador en el proceso.

La potencia desarrollada en el subsistema de torque mecánico se suministra a un tercer subsistema que simula a un generador DC, el cual emite salidas de potencia (P), voltaje (V) e intensidad (I), además de retroalimentar la salida de torque mecánico (T_{em}) hacia la entrada del segundo subsistema.

La simulación del generador DC en el tercer subsistema, se encarga de transformar la energía mecánica del proceso en componentes eléctricas del sistema, tales como voltaje, potencia e intensidad comentadas anteriormente.

La potencia producida por el generador DC es conducida a un cuarto subsistema de arranque y parada, el cual consiste en tomar dicha potencia y asociarla con las velocidades producidas por el viento, para así obtener la respuesta de potencia del sistema mediante las variaciones producidas en el aerogenerador.

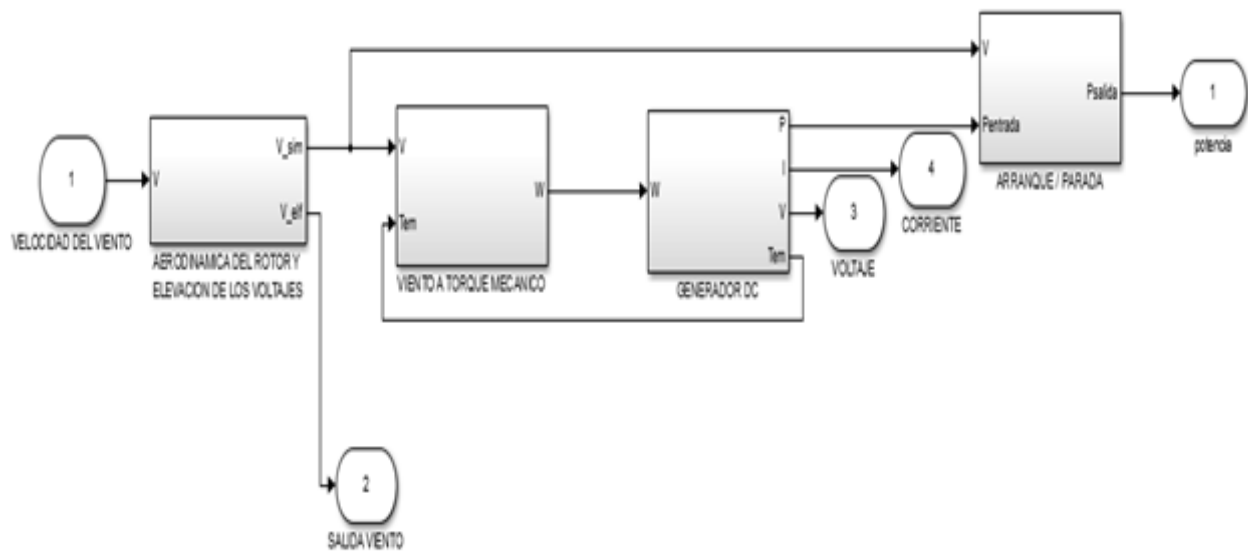


Figura 4.4 – Simulación de un Aerogenerador en Simulink.

4.1.3 Simulación de Sistema de Control de Temperatura.

El desarrollo de un control de temperatura en Simulink consta de diversos factores, así como: constante de entrada, controlador PID, conversores de Simulink y sensor de temperatura, entre los más importantes, además de tener configuraciones pertinentes en el sistema. Los componentes utilizados en la implementación se detallan y visualizan en la Figura 4.5 correspondiente a la simulación de un control de temperatura.

En la simulación del control de temperatura se establece una constante de entrada, la que determina el Setpoint del sistema dependiendo del valor deseado o requerido. El valor ingresado fluye como dato hacia un comparador, el cual compara la señal de entrada al sistema con la señal de retroalimentación, permitiendo la autocorrección del sistema en caso de perturbaciones. Luego se implementa un controlador PID (Proporcional-Integrativo-Derivador), el que se encarga de disminuir las oscilaciones y llevar el error a cero, lo que permite al sistema establecer una señal limpia y trabajar correctamente.

Se utiliza un convertidor Simulink-PS, el cual recibe la señal resultante del controlador PID y cuyo objetivo es transformar la señal de entrada Simulink en una señal física, con el fin de simular los grados de temperatura para el sistema, dependiendo el valor ingresado en la constante de entrada. La señal física resultante se conecta a un bloque que representa una fuente ideal de energía térmica que es lo suficientemente potente como para mantener la temperatura especificada en su salida, independientemente del flujo de calor consumido por el sistema. La conexión "S" del bloque corresponde a un puerto de señal física y se conecta a la salida del convertidor Simulink PS. Además las conexiones de bloque "A" y "B" corresponden a los puertos de entrada y salida de la conservación térmica, respectivamente. La conexión de entrada "A", se conecta a un bloque que representa un punto de referencia térmico, es decir, un punto con temperatura cero o constante, con respecto al cual se determinan todas las temperaturas en el sistema, mientras que la conexión de salida "B", se conecta a un sensor de temperatura en el puerto "B".

El sensor de temperatura posee una entrada “A” que se conecta al bloque que representa un punto de referencia térmico, además consta de un puerto “B” que se conecta a la salida “B” de la fuente ideal de energía térmica, como se especificó anteriormente. El puerto de salida “T” del sensor es el que entrega el valor final de temperatura generado por el sistema y se conecta a un conversor PS-Simulink, con el fin de transformar la señal física trabajada en una señal de salida Simulink y así conectar la retroalimentación al comparador del sistema. Paralelamente se conecta un Scope al sistema para visualizar la señal de salida obtenida como se visualiza en la Grafica 4.1 correspondiente a la respuesta de salida del control de temperatura.

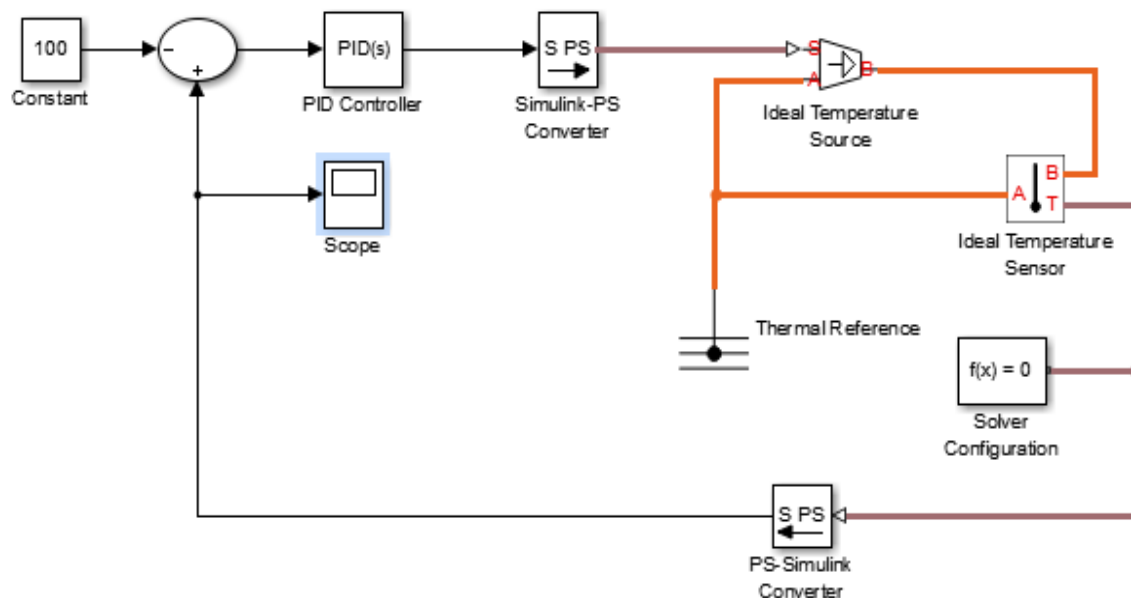


Figura 4.5 – Simulación de un Control de Temperatura en Simulink.

El Grafico 4.1 representa la respuesta del control de temperatura para un set point de ejemplo en 100 grados, donde se aprecia que la respuesta llega lentamente al valor deseado.

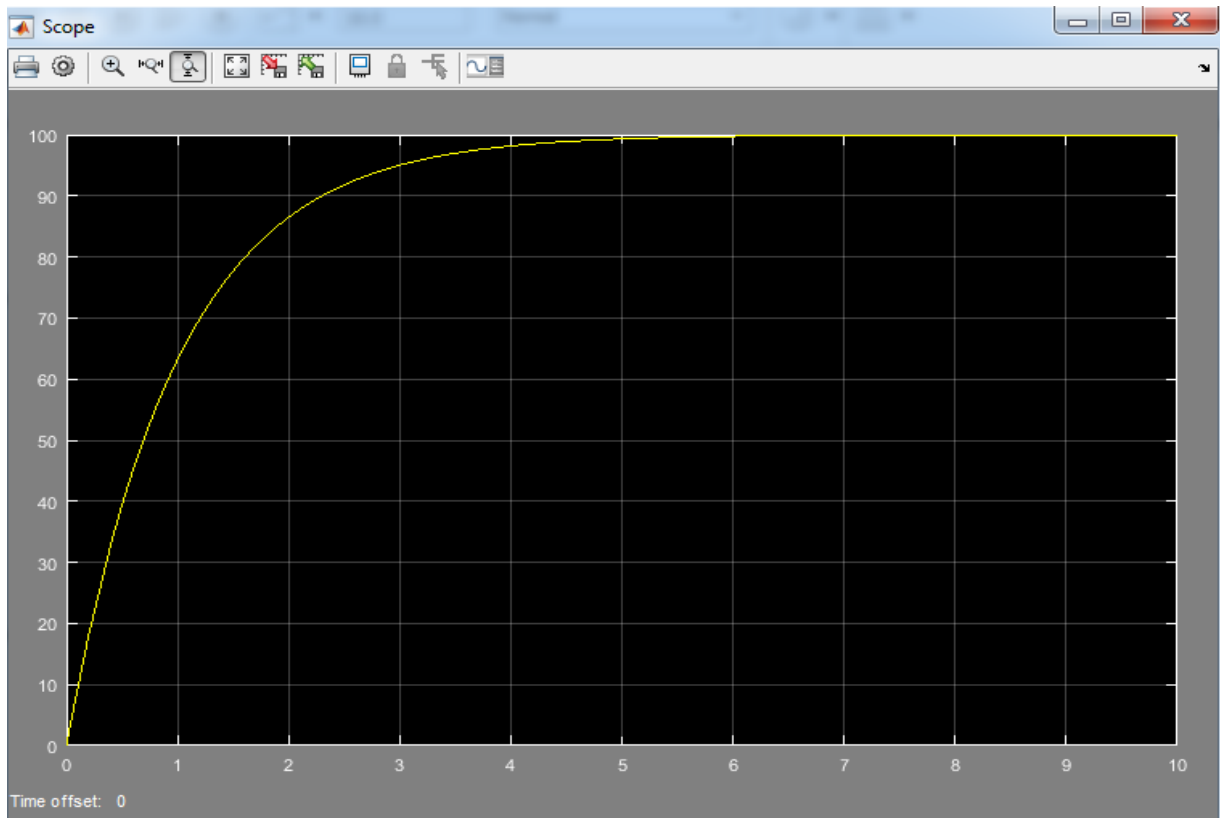


Grafico 4.1 – Respuesta en Control de Temperatura Simulink.

4.2 Resultados.

Los resultados se centran fundamentalmente en analizar la factibilidad de implementación de los sistemas híbridos, profundizando principalmente en el costo de implementación de estos sistemas renovables y el costo energético que se estaría ahorrando con estos sistemas.

4.2.1 Costo de Implementación.

Para lograr el costo de implementación de sistemas híbridos, se debe tener el costo asociado a la implementación fotovoltaica y eólica necesaria para abastecer de energía a las distintas potencias de sistemas de control de temperatura.

El costo de implementación de los sistemas híbridos solar y eólico, se determina teniendo en cuenta el factor de espacio existente en las empresas o industrias, ya que las instalaciones fotovoltaicas y las implementaciones de aerogeneradores eólicos necesitan contar con el espacio adecuado para situarse. Además de espacio otro factor a tener en cuenta es la eficiencia de estos sistemas renovables, por lo cual para una determinada potencia a satisfacer es necesario contar con un suministro un poco mayor al especificado. Incluyendo estos factores o limitaciones se realiza la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2, que se enfocan en detallar los costos asociados para el sistema fotovoltaico y sistema eólico respectivamente.

En la Tabla 4.1 se aprecia un conjunto de columnas indicando distintos conceptos, tales como:

- 1) Consumo KWH: En esta columna se especifican distintas potencias asociadas a controles de temperaturas, desde sistemas con mínima cantidad de potencia por hora hasta sistemas con gran cantidad de potencia por hora.
- 2) Costo Módulos Solares (1000W): Costo total en pesos de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer las distintas potencias asociadas.

- 3) Cantidad Módulos Solares: Cantidad necesaria de módulos fotovoltaicos para satisfacer las distintas potencias asociadas.
- 4) KW Generados: KW generado por los módulos fotovoltaicos.
- 5) Metro Cuadrado: Representa el espacio en metros cuadrados que ocuparían las distintas cantidades de módulos fotovoltaicos.
- 6) Metro x Metro: Representa el largo y ancho en espacio asociado a los metros cuadrados.
- 7) Costo implementos básicos para funcionamiento: En esta columna se hace referencia al costo de los implementos básicos como baterías, inversores, cables y mano de obra entre otros.

Nota: En las implementaciones de sistemas fotovoltaicos el 70% a 80% del costo total de la inversión se debe solo a paneles solares, el porcentaje restante se asocia a la mano de obra e implementos básicos para el funcionamiento.

Las columnas primordiales a considerar en la Tabla 4.1 son las columnas de Costo de módulos solares y Costo de implementos básicos para funcionamiento, ya que la suma de los valores vinculados proporciona el costo total de la implementación fotovoltaica necesaria para abastecer las diferentes potencias.

Tabla 4.1 – Costo de Implementación Sistema Fotovoltaico.

Consumo KWH	Costo Modulos Solares	Cantidad M.Solares	KW Generados	Metro Cuadrado	Metro x Metro	Costo implementos basicos para funcionamiento
2.500	\$ 165.082.500	375	375	2655	51,52	\$ 49.524.750
2.000	\$ 166.083.000	300	300	2124	46,08	\$ 49.824.900
1.500	\$ 106.553.250	225	225	1593	39,91	\$ 31.965.975
1.000	\$ 76.038.000	150	150	1062	32,58	\$ 22.811.400
700	\$ 168.851.050	305	305	2159,4	46,46	\$ 50.655.315
500	\$ 161.414.000	275	275	1927	44,12	\$ 48.424.200
250	\$ 127.903.920	188	188	1331,04	36,48	\$ 38.371.176
100	\$ 64.232.100	90	90	637,2	25,24	\$ 19.269.630
50	\$ 23.551.770	33	33	233,64	15,28	\$ 7.065.531
25	\$ 20.697.010	29	29	205,32	14,32	\$ 6.209.103
10	\$ 8.564.280	12	12	92,04	9,59	\$ 2.569.284

La Tabla 4.2 muestra un grupo de columnas indicando variados conceptos, tales como:

- 1) Consumo KWH: En esta columna se especifican distintas potencias asociadas a controles de temperaturas, desde sistemas con mínima cantidad de potencia por hora hasta sistemas con gran cantidad de potencia por hora.
- 2) Costo Aerogenerador: Costo total en pesos de aerogenerador eólico necesario para satisfacer las distintas potencias asociadas.
- 3) Cantidad Aerogenerador: Cantidad necesaria de aerogeneradores eólicos para satisfacer las distintas potencias asociadas.
- 4) KW Aerogenerador: KW en capacidad que tiene cada aerogenerador eólico.
- 5) KW Generados: KW generado por aerogenerador eólico.

En la Tabla 4.2, la columna de Costo aerogenerador representa los valores de implementación eólica necesarios para satisfacer las distintas potencias.

Tabla 4.2 – Costo de Implementación Sistema Eólico.

Consumo KWH	Costo Aerogenerador	Cantidad Aerogenerador	KW Aerogenerador	KW Generados
2.500	\$ 5.002.500.000	2.1	1000-500	2500
2.000	\$ 4.002.000.000	2	1000	2000
1.500	\$ 3.001.500.000	1.1	1000-500	1500
1.000	\$ 1.400.700.000	1	1000	1000
700	\$ 1.000.500.000	1	500	500
500	\$ 600.300.000	3	100	300
250	\$ 200.100.000	2	50	100
100	\$ 50.025.000	1	25	25
50	\$ 50.025.000	1	25	25
25	\$ 0	0	0	0
10	\$ 0	0	0	0

La Tabla 4.3 muestra las columnas importantes de las Tablas 4.1 y 4.2 mencionadas anteriormente, se realiza la suma de los valores asociados generando el costo de implementacion del sistema hibrido solar y eolico necesario para abastecer las distintas potencias de un control de temperatura.

Tabla 4.3 – Costo de Implementación Sistema Híbrido.

Consumo KWH	Costo Modulos Solares	Costo implementos basicos para funcionamiento	Aerogenerador	Costo Implementacion
2.500	\$ 165.082.500	\$ 49.524.750	\$ 5.002.500.000	\$ 5.217.107.250
2.000	\$ 166.083.000	\$ 49.824.900	\$ 4.002.000.000	\$ 4.217.907.900
1.500	\$ 106.553.250	\$ 31.965.975	\$ 3.001.500.000	\$ 3.140.019.225
1.000	\$ 76.038.000	\$ 22.811.400	\$ 1.400.700.000	\$ 1.499.549.400
700	\$ 168.851.050	\$ 50.655.315	\$ 1.000.500.000	\$ 1.220.006.365
500	\$ 161.414.000	\$ 48.424.200	\$ 600.300.000	\$ 810.138.200
250	\$ 127.903.920	\$ 38.371.176	\$ 200.100.000	\$ 366.375.096
100	\$ 64.232.100	\$ 19.269.630	\$ 50.025.000	\$ 133.526.730
50	\$ 23.551.770	\$ 7.065.531	\$ 50.025.000	\$ 80.642.301
25	\$ 20.697.010	\$ 6.209.103	\$ 0	\$ 26.906.113
10	\$ 8.564.280	\$ 2.569.284	\$ 0	\$ 11.133.564

4.2.2 Polinomio Asociado a Costo de Implementación de Sistemas Híbridos.

El costo de implementación de sistemas híbridos, involucra una variedad de factores y conceptos visualizados en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Agrupando todos los conceptos y factores estudiados en las tablas anteriores, se genera un polinomio asociado al costo de implementación de sistemas híbridos, buscando la forma de expresar y simplificar el cálculo de dichas tablas, en la fórmula de un polinomio.

Factores para el cálculo de implementación sistema híbrido:

Z = Costo Total de Implementación Sistemas Híbridos.

A = Costos Implementación Básica para Funcionamiento.

B = Costo de Dólar por Watts generado en Panel Solar.

C = Valor Actual Dólar (\$).

D = Consumo de Watts por Hora del Panel Solar.

E = Cantidad Paneles Solares a Utilizar.

F = Costo de Dólar por Watts generado por Aerogenerador.

G = Costo por KW del Aerogenerador.

H = Cantidad de KW a generar por el Aerogenerador.

Polinomio resultante:

$$Z = A + (B * C * D * E) + (F * C * G * H)$$

Ecuación 3.18 – Polinomio Costo de Implementación.

4.2.3 Calculo Costo Energético.

El costo energético en este punto consiste en calcular el costo de un consumo específico de una empresa o industria, con el fin de realizar una comparación de la forma más cercana posible con respecto a la realidad. Es importante mencionar que este cálculo variara dependiendo de la empresa o industria involucrada, de su tamaño e implementaciones. Este cálculo de costo energético se llevara a cabo con valores promedios en algunos parámetros.

Las compañías encargadas de suministrar energía eléctrica en Chile constan con diferentes tarifas y costos dependiendo del cliente (empresa/industria o comunidad). La Tabla 4.4 representa los costos que se le cobra a las empresas o industrias, donde la tarifa predeterminada es la de BT4.

Tabla 4.4 – Cargos Fijos.

	Cargos Fijos (\$ - Cliente)						
	BT-4.1	BT-4.2	BT-4.3	Total Cargos Fijos	Energía (\$- kWh)	Potencia Total Controlada o Leída	Demanda Maxima por Hora Punta (\$-kW/mes)
NETO	\$ 622,4	\$ 963,9	\$ 1.060,2	\$ 2.646,4	\$ 59,0	\$ 1.608,6	\$ 7.207,7
Con IVA	\$ 740,6	\$ 1.147,0	\$ 1.261,6	\$ 3.149,2	\$ 70,2	\$ 1.914,2	\$ 8.577,2

La Tabla 4.5 muestra las tarifas de suministro eléctrico existentes.

Tabla 4.5 – Tarifas de Suministro Eléctrico.

VALORES NETOS y C/IVA ENEL TARIFAS DE SUMINISTRO	
BT-1	Cargo Fijo (\$/cliente)
	Energía Base (\$/kWh)
	E. Adicional de Invierno (\$/kWh)
BT-2	Cargo Fijo (\$/cliente)
BT-3	Cargo Fijo (\$/cliente)
	Energía (\$/kWh)
	Cons. Parc. Pte. Pta (\$/kW/mes)
	Cons. Pte. Punta (\$/kW/mes)
BT-4	Cargo Fijo BT - 4.1 (\$/cliente)
	Cargo Fijo BT - 4.2 (\$/cliente)
	Cargo Fijo BT - 4.3 (\$/cliente)
	Energía (\$/kWh)
	Pot Total Cont o Leída (\$/kW/mes)
	Dem. Máx. de Punta (\$/kW/mes)

La Tabla 4.6 especifica un conjunto de columnas indicando distintos conceptos, tales como:

- 1) Consumo KWH: Representa distintas potencias asociadas a controles de temperaturas en industrias o empresas, desde sistemas con mínima cantidad de potencia por hora hasta sistemas con gran cantidad de potencia por hora.
- 2) KWH por Día: Representa el consumo energético en KWH en un Día y el cálculo asociado es el producto entre el Consumo KWH por las 24 horas del día.
- 3) KWH por Mes: Representa el consumo energético en KWH en un Mes y el cálculo asociado es el producto entre KWH por Día por los 30 días promedios del Mes.
- 4) Costo Energía KWH: Representa el costo energético referente al KW por hora y el cálculo asociado es el producto entre el valor de tarifa de energía KWH especificado en la Tabla 4.4 por el Consumo KWH respectivo.
- 5) Costo Energía KW Día: Representa el costo energético referente al KW por día y el cálculo asociado es el producto entre el valor de tarifa de energía KWH especificado en la Tabla 4.4 por el KWH por Día.
- 6) Costo Energía KW Mensual: Representa el costo energético referente al KW por mes y el cálculo asociado es el producto entre el valor de tarifa de energía KWH especificado en la Tabla 4.4 por el KWH por Mes.
- 7) Demanda Máxima por Hora Punta KW Mes: Hace referencia a una tarifa en horario especial utilizadas en las empresas o industrias y el cálculo asociado es el producto entre el valor de tarifa de demanda máxima por hora punta especificada en la Tabla 4.4 por un promedio de 33 horas (este factor se determinó con un promedio, ya que este valor dependerá de la empresa o industria involucrada).

- 8) Total Consumo al Mes: Representa en consumo energético total al mes y el cálculo asociado es la sumatoria entre Costo Energía KW Mensual, Demanda Máxima por Hora Punta KW Mes y los Cargos Fijos asociados.
- 9) Total Consumo al Año: Representa en consumo energético total al año y el cálculo asociado es producto entre el Total Consumo al Mes por 12 vinculado al total de meses del año.

Tabla 4.6 – Costo Energético.

Consumos kWh	kWh por Día	kWh por Mes	Costo Energía kWh	Costo Energía kW Día	Costo Energía kW Mensual	Demanda Maxima por Hora Punta (\$-kW/mes)	Total Consumo al Mes	Total Consumo al Año
2.500	60.000	1.800.000	\$ 175.500	\$ 4.212.000	\$ 126.360.000	\$ 283.047,6	\$ 126.646.197	\$ 1.519.754.362
2.000	48.000	1.440.000	\$ 140.400	\$ 3.369.600	\$ 101.088.000	\$ 283.047,6	\$ 101.374.197	\$ 1.216.490.362
1.500	36.000	1.080.000	\$ 105.300	\$ 2.527.200	\$ 75.816.000	\$ 283.047,6	\$ 76.102.197	\$ 913.226.362
1.000	24.000	720.000	\$ 70.200	\$ 1.684.800	\$ 50.544.000	\$ 283.047,6	\$ 50.830.197	\$ 609.962.362
700	16.800	504.000	\$ 49.140	\$ 1.179.360	\$ 35.380.800	\$ 283.047,6	\$ 35.666.997	\$ 428.003.962
500	12.000	360.000	\$ 35.100	\$ 842.400	\$ 25.272.000	\$ 283.047,6	\$ 25.558.197	\$ 306.698.362
250	6.000	180.000	\$ 17.550	\$ 421.200	\$ 12.636.000	\$ 283.047,6	\$ 12.922.197	\$ 155.066.362
100	2.400	72.000	\$ 7.020	\$ 168.480	\$ 5.054.400	\$ 283.047,6	\$ 5.340.597	\$ 64.087.162
50	1.200	36.000	\$ 3.510	\$ 84.240	\$ 2.527.200	\$ 283.047,6	\$ 2.813.397	\$ 33.760.762
25	600	18.000	\$ 1.755	\$ 42.120	\$ 1.263.600	\$ 283.047,6	\$ 1.549.797	\$ 18.597.562
10	240	7.200	\$ 702	\$ 16.848	\$ 505.440	\$ 283.047,6	\$ 791.637	\$ 9.499.642

4.2.4 Polinomio Asociado a Costo Energético.

El costo energético, involucra una variedad de factores y conceptos visualizados en las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6. Vinculando todos los conceptos y factores estudiados en las tablas anteriores, se genera un polinomio asociado al costo energético, buscando la forma de simplificar y expresar el cálculo de dichas tablas, en la fórmula de un polinomio.

Factores para el cálculo de costo energético:

Y = Consumo Total al Año (\$).

P = Consumo KWH.

T = Valor KWH de Energía.

R = Cargos Fijos.

S = Valor de Demanda Máxima por Hora Punta al Mes.

Polinomio resultante:

$$Y = \{ R + (P * T * 24 * 30) + (S * 33) \} * 12$$

Ecuación 3.19 – Polinomio Costo Energético.

4.2.5 Recuperación de Inversión.

La recuperación de inversión consiste en analizar el tiempo donde se comienzan a tener ganancias en el ámbito energético, esto se refiere al momento en que la empresa o industria se comienza a abastecer de energía eléctrica gracias al sistema híbrido implementado sin necesidad de pagar el costo energético asociado.

La Tabla 4.7 acopla los datos y valores estudiados en las Tablas 4.3 y 4.6, con el objetivo de especificar y detallar la recuperación de inversión en años.

Tabla 4.7 – Recuperación de la Inversión.

Consumo KWH	KW TOTALES	Costo Implementacion	Gasto Energetico Total por Mes	Gasto Energetico Total por Año	Recuperacion de la Inversion (Años)
2.500	2875	\$ 5.437.914.265	\$ 126.646.197	\$ 1.519.754.364	3,6
2.000	2300	\$ 4.217.907.900	\$ 101.374.697	\$ 1.216.496.364	3,5
1.500	1875	\$ 3.140.019.225	\$ 76.102.197	\$ 913.226.364	3,4
1.000	1250	\$ 1.499.459.400	\$ 50.830.197	\$ 609.962.364	2,5
700	875	\$ 1.220.006.365	\$ 35.666.997	\$ 428.003.964	2,9
500	625	\$ 810.138.200	\$ 25.558.197	\$ 306.698.364	2,6
250	313	\$ 366.375.096	\$ 12.922.197	\$ 155.066.364	2,4
100	125	\$ 133.526.730	\$ 5.340.597	\$ 64.087.164	2,1
50	63	\$ 80.642.301	\$ 2.813.397	\$ 33.760.764	2,4
25	32	\$ 26.906.113	\$ 1.549.797	\$ 18.597.564	1,4
10	0	\$ 11.133.564	\$ 791.637	\$ 9.499.644	1,2

Nota: Es importante recordar que la finalidad de estos resultados es analizar y estudiar la factibilidad de implementación de un sistema híbrido para auto-sustentar distintas potencias de un control de temperatura y que los conceptos, datos y valores utilizados, pertenecen al mejor de los casos, ya que se trabajó con datos promedios y esto variara dependiendo de la empresa o industria involucrada, de su tamaño e implementaciones.

4.2.6 Polinomio de Recuperación de Inversión.

La recuperación de inversión está dada por los polinomios fabricados en los puntos 4.2.2 y 4.2.4.

Donde se tiene:

Z = Costo Total de Implementación Sistemas Híbridos.

Y = Consumo Total al Año (\$).

Entonces mediante estas variantes, se obtiene finalmente:

$$\frac{Z}{Y} = \frac{A + (B * C * D * E) + (F * C * G * H)}{\{ R + (P * T * 24 * 30) + (S * 33) \} * 12}$$

Ecuación 3.20 – Polinomio de Recuperación de Inversión.

4.3 Gráficos de Resultados.

Los gráficos de resultados puntualizan comparativas entre diferentes rangos de consumos de potencias con su costo de implementación asociado y el costo energético que gasta dicha potencia.

4.3.1 Gráfico de Consumo vs Costo de Implementación.

El Grafico de Consumo versus Costo de Implementación detalla el costo en pesos que se necesita para implementar un sistema hibrido solar y eólico, que sea capaz de auto sustentar distintas potencias para control de temperatura.

La respuesta del Grafico 4.2 es directamente proporcional, lo que significa que mientras más potencia se necesita abastecer, más es el costo de implementación requerido para construir un sistema hibrido.

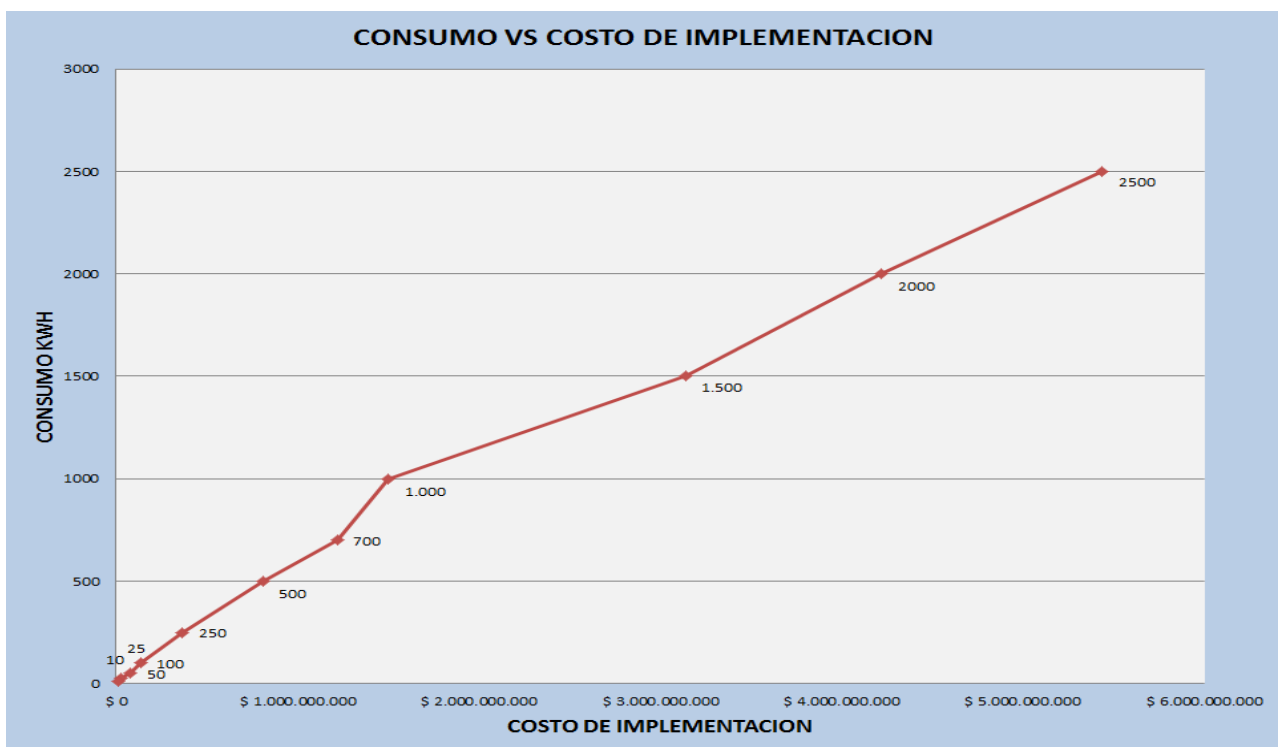


Grafico 4.2 – Consumo vs Costo de Implementación.

4.3.2 Gráfico de Consumo vs Costo Energético.

El Grafico de Consumo versus Costo Energético, representa el costo energético en pesos que gasta una empresa o industria para satisfacer distintas potencias de consumo en un control de temperatura.

La respuesta del Grafico 4.3 es directamente proporcional, lo que expresa que mientras más potencia se necesita abastecer, más es el costo energético que debe pagar la empresa o industria por el consumo utilizado.

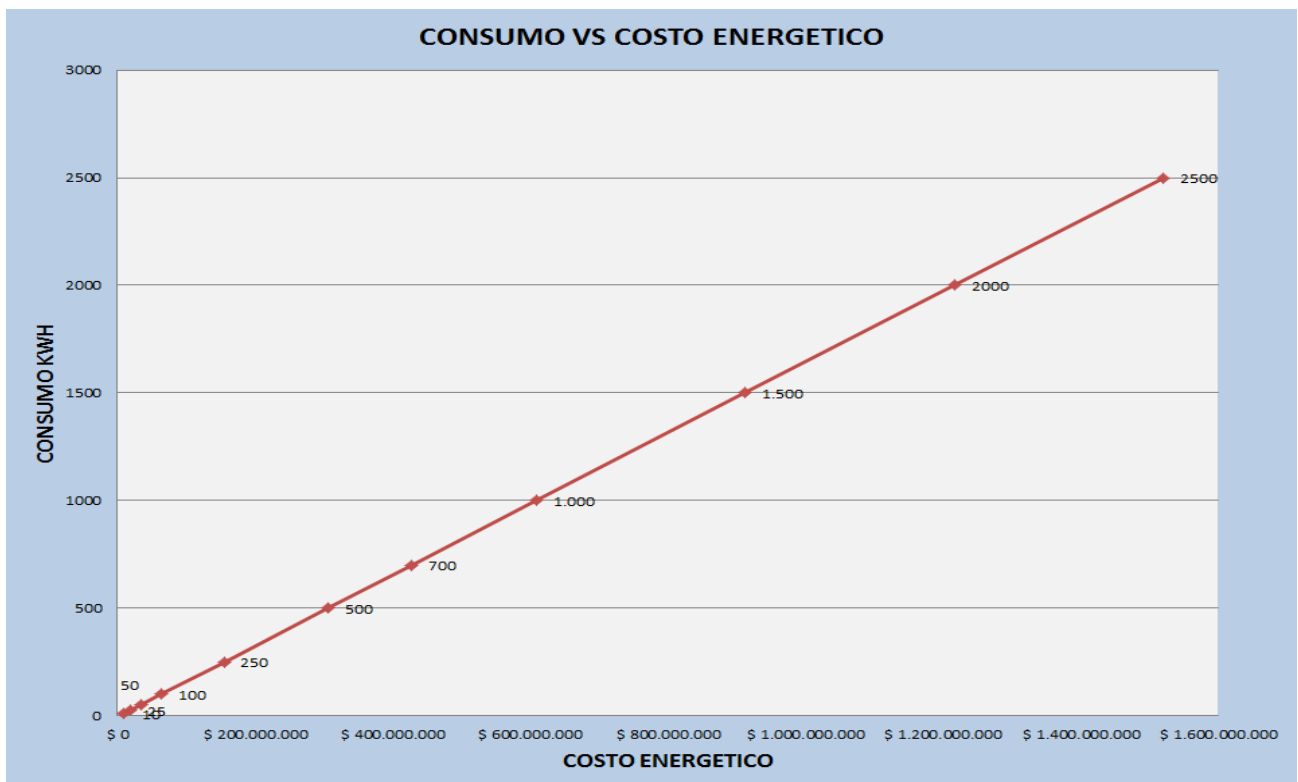


Grafico 4.3 – Consumo vs Costo Energético.

4.3.3 Gráfico de Costo de Implementación en el Tiempo.

El grafico de Costo de Implementación en el Tiempo, especifica el punto en años que se recupera la inversión al realizar una implementación de un sistema hibrido solar y eólico para una determinada potencia.

En esta parte de la Memoria se realizan 3 gráficos distintos, donde se muestra el Costo de Implementación en el Tiempo de forma Ideal, Relativa y Defectiva.

El Grafico 4.4 representa una respuesta ideal en el tiempo. Esto se refiere, a que en el mejor de los casos, según lo realizado en la memoria, la recuperación de la inversión será como se visualiza en la siguiente gráfica.

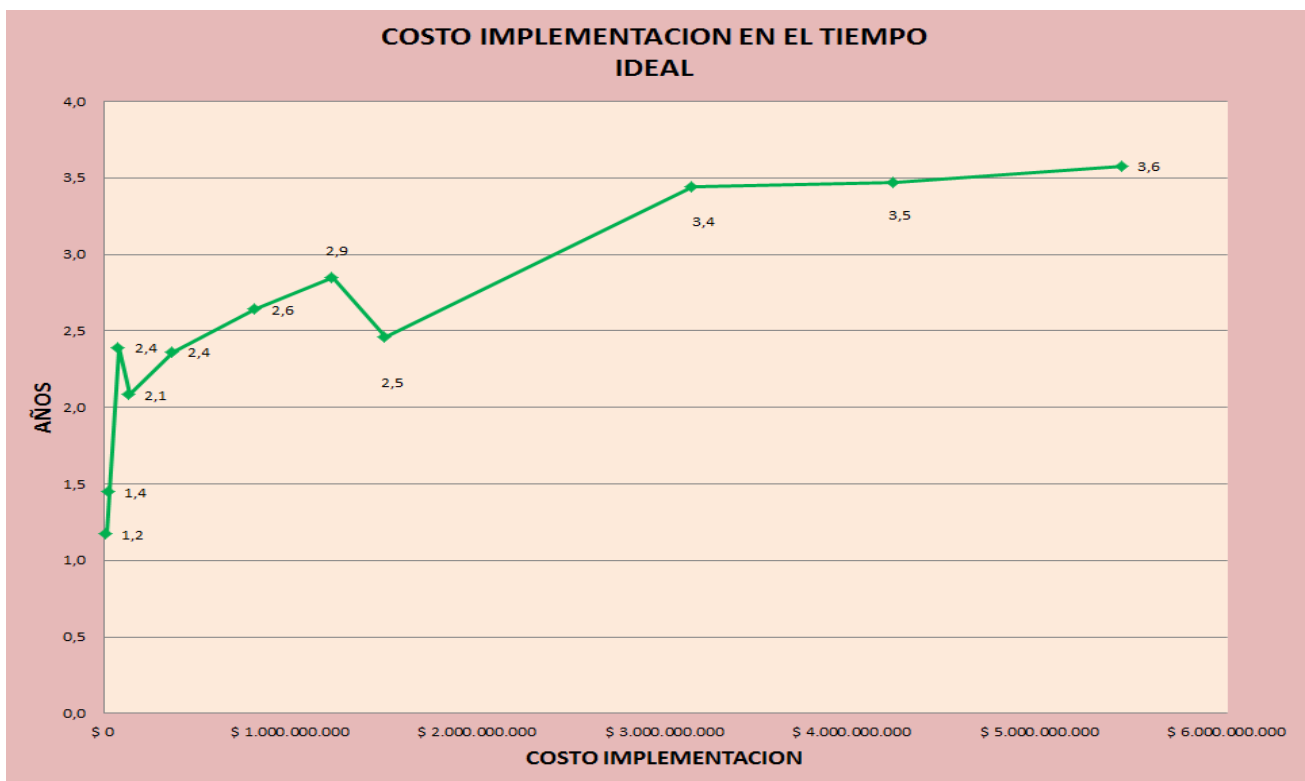


Grafico 4.4 – Costo de Implementación en el Tiempo (Ideal).

El Grafico 4.5 representa una respuesta Relativa en el tiempo. Esto se refiere, a que variando medianamente algunos parámetros, tanto en costo de implementación como en el costo energético, se puede apreciar que según lo realizado en la memoria, la recuperación de la inversión será como se visualiza en la siguiente gráfica.

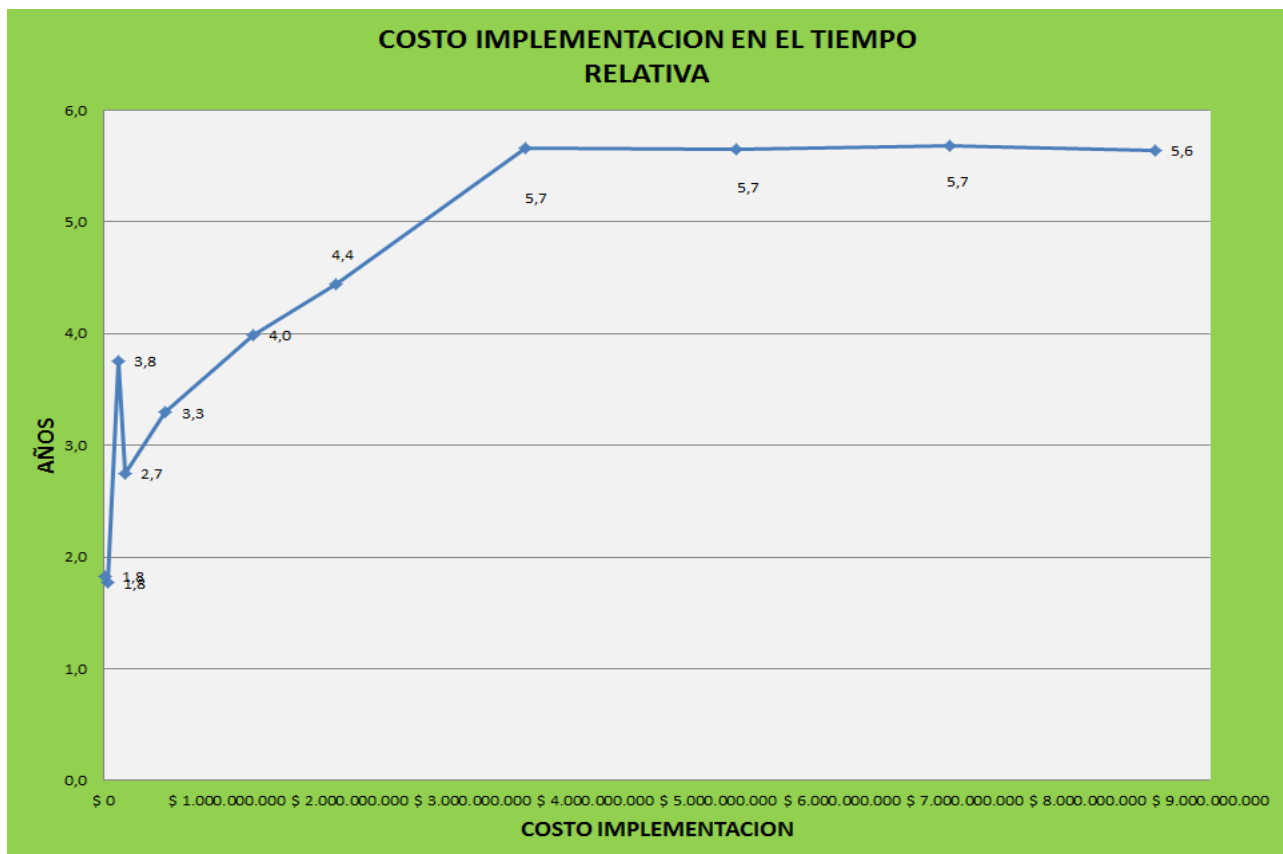


Grafico 4.5 – Costo de Implementación en el Tiempo (Relativa).

El Grafico 4.6 representa una respuesta Defectiva en el tiempo. Esto se refiere, a que variando altamente algunos parámetros, tanto en costo de implementación como en el costo energético, se puede apreciar que según lo realizado en la memoria, la recuperación de la inversión será como se visualiza en la siguiente gráfica.

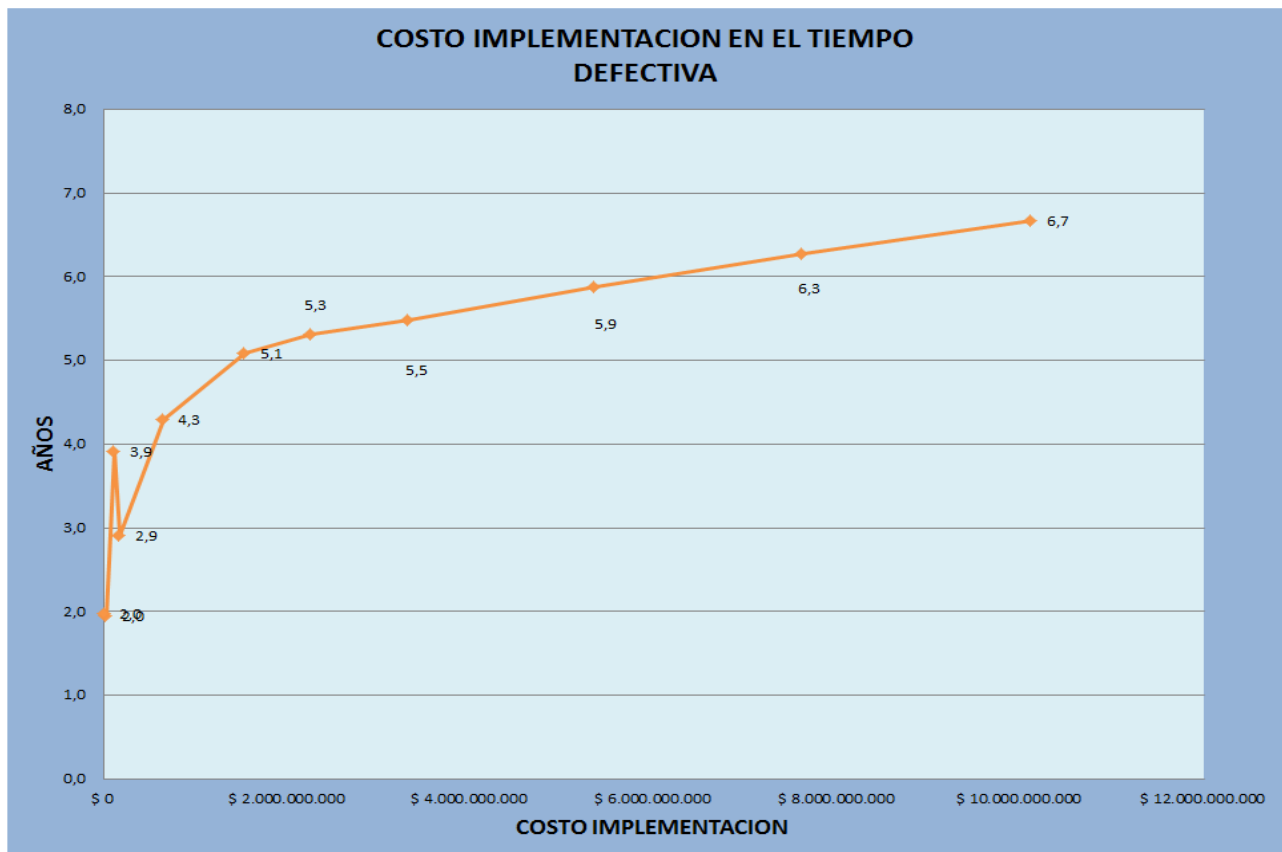


Grafico 4.6 – Costo de Implementación en el Tiempo (Defectiva).

Analizando las distintas graficas obtenidas, se puede mencionar que, al variar algunos parámetros del costo de implementación y costo energético, la recuperación de inversión se aleja cada vez más en el tiempo.

En ámbito general, se representa que, para construir un sistema hibrido de energías renovables dependiendo de las potencias que se requieren abastecer, el costo de implementación aumenta y la recuperación de la inversión de aleja en años. Sin embargo, a medida que las potencias y el costo de implementación aumentan, la recuperación de inversión se va haciendo cada vez más constante en el tiempo.

Capítulo 5: Conclusiones.

Este capítulo se enfoca en comentar todas las conclusiones de los análisis y resultados obtenidos en los puntos anteriores, con el fin de buscar una retroalimentación y ver si posible tanto en costo como eficacia para la industria este tipo de sistemas.

5.1 Conclusión de Memoria de Título.

La presente memoria tuvo como objetivo fundamental estudiar, analizar e investigar la factibilidad de implementación de sistemas híbridos solar y eólico para auto sustentar el control de procesos industriales, donde se utilizó principalmente un control de temperatura para así analizar la implementación híbrida para diferentes potencias de trabajo.

Para llevar a cabo el objetivo principal de la memoria, se necesitaron cumplir con otros objetivos de igual importancia, por lo cual en la primera parte del trabajo se investigó la evolución de las energías renovables a lo largo del tiempo, y de cómo este fenómeno energético aumentaba constantemente debido al veloz agotamiento de los combustibles fósiles. A causa de esto, se logró entender y comprender la importancia de las energías renovables en Chile y el mundo, ya que los recursos energéticos que en el pasado accionaban el planeta, día tras día dejan de existir, de tal forma que no es exagerado afirmar gracias a la realización de esta memoria que las energías renovables no convencionales son y serán la solución de un futuro no muy lejano.

Profundizando en lo mencionado anteriormente y dado a que Chile tiene una geografía natural que beneficia el desarrollo energético, se decidió trabajar e indagar primordialmente en las energía renovables solar y eólica, con el objetivo de crear un sistema híbrido de estas energías, que inciden de mayor proyección y futuro. Debido a esto se estudió todo lo necesario acerca de las energías renovables, considerando los conceptos más importantes y necesarios, además de investigar las diferentes fuentes de energías. Este estudio ayudo a captar el proceso y funcionamiento de distintas tecnologías aplicadas en la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, y con esto se logró comprender el sistema, estructura e implementaciones que se deben tener para llevar a cabo un proceso de esta magnitud, ya que para crear y producir electricidad mediante energías renovables se debe tener la tecnología y estructuras pertinentes.

Uno de los factores de suma importancia en la memoria fue investigar, analizar y realizar las simulaciones sobre los sistemas renovables solar y eólico, con la meta de estudiar diferentes sistemas híbridos capaces de abastecer de energía a distintas potencias de un control de temperatura industrial.

Las simulaciones fueron necesarias para analizar y comprender el proceso que involucraban los sistemas fotovoltaicos, eólicos y el control de temperatura, además de entender el funcionamiento mecánico y eléctrico asociado a estos procesos. A medida que se implementaban las simulaciones en Simulink, se pudo conocer y aprender sobre los diversos tipos de componentes y tecnologías necesarias para estas aplicaciones, debido a esto se amplió la visión y aprendizaje que se tenía antes de comenzar la memoria.

Finalmente luego de un sinfín de análisis, estudios e investigaciones se logró dar con el objetivo principal de la memoria, donde sí es factible implementar, generar y abastecer energía eléctrica mediante un sistema híbrido de energías renovables.

Independientemente del costo de implementación asociado o necesario para llevar a cabo este proyecto, es fundamental tener en cuenta que al largo plazo es factible esta inversión, dado que el gasto energético asociado a los controles de temperatura industriales será constante en el tiempo mientras que al realizar una implementación híbrida llega un punto en el que se recupera la inversión y desde allí en adelante solo es ahorro y ganancia para la empresa o industria que realice esta inversión.

Dado que se consiguió cumplir con el objetivo general, se puede afirmar que un sistema híbrido de energías renovables, no solo es capaz de sustentar diferentes potencias de un control de temperatura industrial, sino que además puede ser capaz de auto-sustentar cualquier control de proceso industrial.

Bibliografía

1. *centraleolicaa*. (2010). Obtenido de <https://centraleolica.wordpress.com/partes-de-un-aerogenerador/>
2. *Ingelibre*. (2015). Obtenido de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
3. (2016). *Componentes de una instalacion fotovoltaica*.
4. *Plantadebiomasa*. (2016). Obtenido de <http://www.plantasdebiomasa.net/que-es-la-biomasa.html>
5. *Todo sobre paneles fotovoltaicos*. (2016). Obtenido de <http://paneles-fotovoltaicos.blogspot.com/2013/01/que-es-y-como-funciona-un-panel.html>
6. *Energia solar*. (13 de 4 de 2017). Obtenido de <https://solar-energia.net/definiciones/radiacion-solar.html>
7. *SotySolar*. (2017). Obtenido de <https://sotysolar.es/placas-solares/rendimiento>
8. *Energia solar*. (2018). Obtenido de <https://solar-energia.net/definiciones/modulo-o-panel-fotovoltaico.html>
9. A.Aponte Castro. (2015). *Control PID para el control de temperatura*. Obtenido de https://www.academia.edu/24427964/CONTROL_PID_PARA_EL_CONTROL_DE_TEMPERATURA
10. *atersa*. (2017). *Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de <http://www.atersa.es/es/conocenos/aplicaciones-energia-solar-fotovoltaica/>
11. *Calcular paneles solares necesarios*. (s.f.). Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>
12. castro, A. (s.f.). *Academia*. Obtenido de https://www.academia.edu/24427964/CONTROL_PID_PARA_EL_CONTROL_DE_TEMPERATURA
13. *CGE*. (s.f.). Obtenido de <http://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/>
14. *electroindustria*. (s.f.). Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=263>
15. Eliseo. (2012). *Potencia y Energia paneles FV*. Obtenido de <http://eliseosebastian.com/potencia-y-energia-en-paneles-solares-fotovoltaicos/>

16. *enel*. (s.f.). Obtenido de <https://www.eneldistribucion.cl/tarifas>
17. *energias renovables*. (s.f.). Obtenido de <https://solar-energia.net/energias-renovables>
18. *Energías renovables y eficiencia energetica*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
19. *erenovables*, e. (15 de 10 de 2018). *Energia geotermica*. Obtenido de <https://erenovable.com/energia-geotermica/>
20. *ERNC*. (s.f.). Obtenido de <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno14/mercados/lectura/historia>
21. Evolución de Costos ERNC. (6 de 2012). *Energia mareomotriz*. Obtenido de http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html
22. Fajardo, J. (26 de 10 de 2014). *scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/244431775/Antecedentes-historicos-de-las-energias-renovables-docx>
23. Fernando. (26 de 2 de 2018). *erenovable.com*. Obtenido de <https://erenovable.com/energias-renovables/>
24. *Funcionamiento Aerogeneradores*. (s.f.). Obtenido de <http://www.sotaventogalicia.com/es/area-tecnica/instalaciones-eolicas/funcionamiento>
25. Generadoras de Chile. (2017). *Energia Eolica*. Obtenido de <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>
26. Generadoras de Chile. (2017). *Energia hidroelectrica*. Obtenido de <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-hidroelectrica>
27. Generadoras de Chile. (2017). *Energia Solar*. Obtenido de <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-solar>
28. *Influencia de la irradiacion y temperatura*. (s.f.). Obtenido de Para comprender el funcionamiento de un módulo fotovoltaico se debe comprender la descripción anterior asociada a una celda fotovoltaica, ya que un módulo solar es la unión de varias celdas solares, por lo cual el principio de funcionamiento es el mism
29. José A. Alonso Lorenzo. (2015). *Manual de cálculo de sistemas fotovoltaicos aislados*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>
30. M. Mikatia, M. S. (s.f.). *Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto*. Obtenido de www.sciencedirect.com

31. Merino y Perez Porto, J. y. (2012). *Definicion.de*. Obtenido de <https://definicion.de/energia/>
32. Paul, C. G. (s.f.). *ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES PARA USO*. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114747/de-gonzalez_c.pdf?sequence=1
33. Pérez Porto y Gardey, J. y. (2014). *Definicion.de*. Obtenido de <https://definicion.de/energia-renovable/>
34. pizarro, D. o. (s.f.). *La Eficiencia Energética y las Energías Renovables No Convencionales*. Obtenido de <http://www.ingcomercial.ucv.cl/sitio/assets/tesis/tesis-2014/memoria2014olguin.pdf>
35. Sanchez, B. G. (s.f.). *accionamiento regulado para emular aerogeneradores*. Obtenido de <http://oa.upm.es/37761/>
36. *Tipos de energia*. (s.f.). Obtenido de <https://tiposdeenergia.info/tipos-de-energia/>
37. unesa. (2015). *Central solar termica*. Obtenido de <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1350-central-solartermica>
38. Zulueta y Gonzalez. (2014). *Estrategias de control de aerogeneradores*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/269570969 ESTRATEGIAS_DE_CONTROL_DE_AEROGENERADORES